

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(千葉県・銚子地区)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある千葉県銚子地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2003～2023年
標準化に使用した期間	2003～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS II から取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、200m層水温、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経138度-139度)
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	標準化 CPUE は、2008年以降減少、2014年以降は増加に転じ、2023年は解析期間内の最高値を更新した。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と類似した一方、2006～2010年はノミナル CPUE のほうが、2018年以降は標準化 CPUE のほうが顕著に高い値となった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。その結果、千葉県銚子地区の標準化 CPUE は、環境要因による影響をより考慮できていると判断されたこと、モデル診断結果も良好であったことから、VPA のチューニング指数の一つとして導入することとなった。

今年度も昨年度に引き続き、最新年のデータを追加した上で千葉県銚子地区の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある千葉県の銚子地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2003～2023 年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM（log-normal GLM）である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置

情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁（流軸から 13 海里）の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した (Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141)。銚子地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 141 度における黒潮北縁緯度 (Lat_141) を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差（すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141) を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日: 2024 年 4 月 4 日) における深度帯別 (0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層) の水温 (Temperature)、流向 (Direction)、流速 (Speed) の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、銚子地区では図 1 の 26~29 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数 (Direcfct) に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係プロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと (図 2)、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果 (Year)、季節効果 (Quarter: 12 ヶ月を 1~3 月、4~6 月、7~9 月、10~12 月に 4 等分) については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \log(\text{CPUE}) \sim & \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{200} + \text{Temperature}_{400} + \text{Temperature}_{\text{Bottom}} \\ & + \\ & \text{Speed}_0 + \text{Speed}_{100} + \text{Speed}_{200} + \text{Speed}_{400} + \text{Speed}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Direcfct}_0 + \text{Direcfct}_{100} + \text{Direcfct}_{200} + \text{Direcfct}_{400} + \text{Direcfct}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Lat}_{141} + \\ & \text{Lat138}_{139} + \text{Lat139}_{140} + \text{Lat140}_{141} \end{aligned}$$

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準 (AIC) によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル (例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの) は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された (表 1)。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Temperature}_{200} + \text{Lat138}_{139}$$

銚子地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS II による複数層の同一説

明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 26 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。昨年度は、ベストモデルにおいて黒潮の影響に関連する説明変数は選ばれなかったが、今年度は、東経 138～139 度における黒潮北縁の緯度差が含まれた。最小 AIC+2 の範囲の他のモデルをみると、東経 141 度における黒潮北縁緯度や黒潮入込の変数が選ばれるものが多かった。また、ベストモデルにおいては、漁場内の水温が低いほど CPUE は高くなる傾向がみられた (図 4)。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった (図 5)。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった (図 6)。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は、2008 年以降、2013 年まで減少を続けたが、2014 年以降は増加に転じ、2023 年に期間内の最高水準となった。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と類似した一方、2006～2010 年はノミナル CPUE のほうが、2018 年以降は標準化 CPUE のほうが顕著に高い値となった。

3.2 昨年度結果との比較

昨年度は、2.4 モデル選択の条件により選ばれたモデルに季節効果は含まれなかったが、当該地区は親潮の季節変動の影響も考えられることから、環境面での説明力を重視して季節効果を含むモデルをベストモデルとしていた。今年度は付加的情報の考慮に寄らず、基本的なモデル選択条件の基で季節効果が選択されたため、結果として昨年度と同様の説明変数がベストモデルに含まれることとなった。一方、今年度は昨年度のベストモデルになかった東経 138～139 度における黒潮北縁の緯度差が選択されたが、この変数は昨年度も多くのモデル候補に含まれていた。今年度得られた標準化 CPUE の年トレンドに昨年度との大きな違いはなかったことから、1 年分データが追加されたことによるモデル推定結果の大きな変化はなかったと判断できる。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の

漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf

- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和3（2021）年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和3年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもの
のうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向					黒湖北緯緯度				経度間の黒湖北緯の緯度差				流速					水温					季節	年	df	logLik	AIC	delta		
	0	100	200	400	底	東経141度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	400	底	0	100	200	400	底	0	100	200	400							底	
2.22		+				0.06	0.04																		+	+	36	67.0	-62.0	0.0	
2.03		+				0.06	0.04																			+	+	36	66.9	-61.8	0.3
4.74							0.04																			+	+	28	58.7	-61.5	0.6
2.60	+					0.04	0.04																			+	+	36	66.7	-61.4	0.6
4.12	+						0.04																			+	+	35	65.6	-61.2	0.8
2.38	+					0.05	0.04																			+	+	36	66.6	-61.2	0.9
4.76				+			0.04																			+	+	35	65.5	-61.1	1.0
2.14		+				0.07	0.04																			+	+	35	65.5	-60.9	1.1
4.65							0.04																			+	+	27	57.4	-60.8	1.2
4.13	+						0.03																			+	+	36	66.4	-60.8	1.3
4.15		+					0.04																			+	+	35	65.3	-60.7	1.4
1.98		+				0.06	0.04	0.02																		+	+	37	67.3	-60.5	1.5
4.12	+						0.04																			+	+	35	65.3	-60.5	1.5
2.16		+				0.06	0.04																			+	+	36	66.2	-60.5	1.6
4.24							0.04																			+	+	28	58.2	-60.4	1.6
2.02		+				0.06	0.04																			+	+	36	66.2	-60.4	1.6
1.99		+				0.07	0.04																			+	+	35	65.2	-60.3	1.7
4.13	+																									+	+	35	65.1	-60.3	1.8
4.67							0.04																			+	+	27	57.1	-60.2	1.8
4.13	+						0.04																			+	+	34	64.1	-60.2	1.9
2.40		+				0.05	0.04																			+	+	37	67.1	-60.1	1.9
4.13	+																									+	+	35	65.1	-60.1	1.9
4.78							0.04																			+	+	28	58.1	-60.1	1.9
4.76							0.04																			+	+	29	59.1	-60.1	1.9
1.84		+				0.07	0.04	0.01																		+	+	37	67.0	-60.1	2.0
4.13	+						0.03																			+	+	36	66.0	-60.1	2.0

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2003	1.02	1.02	0.90	1.15	0.06
2004	1.06	1.06	0.88	1.24	0.08
2005	0.99	0.96	0.83	1.11	0.07
2006	1.12	1.06	0.94	1.22	0.06
2007	1.20	1.17	1.07	1.25	0.04
2008	1.05	0.98	0.81	1.14	0.09
2009	1.06	0.97	0.80	1.15	0.09
2010	0.99	0.94	0.81	1.09	0.08
2011	0.77	0.77	0.69	0.85	0.05
2012	0.74	0.73	0.63	0.84	0.08
2013	0.59	0.59	0.54	0.64	0.04
2014	0.66	0.65	0.58	0.72	0.05
2015	0.71	0.69	0.61	0.77	0.06
2016	0.88	0.87	0.80	0.95	0.04
2017	0.98	0.98	0.92	1.05	0.04
2018	1.08	1.13	1.03	1.22	0.04
2019	1.14	1.23	1.12	1.34	0.05
2020	1.20	1.23	1.13	1.35	0.05
2021	1.14	1.23	1.09	1.37	0.06
2022	1.23	1.28	1.19	1.36	0.04
2023	1.38	1.47	1.34	1.61	0.05

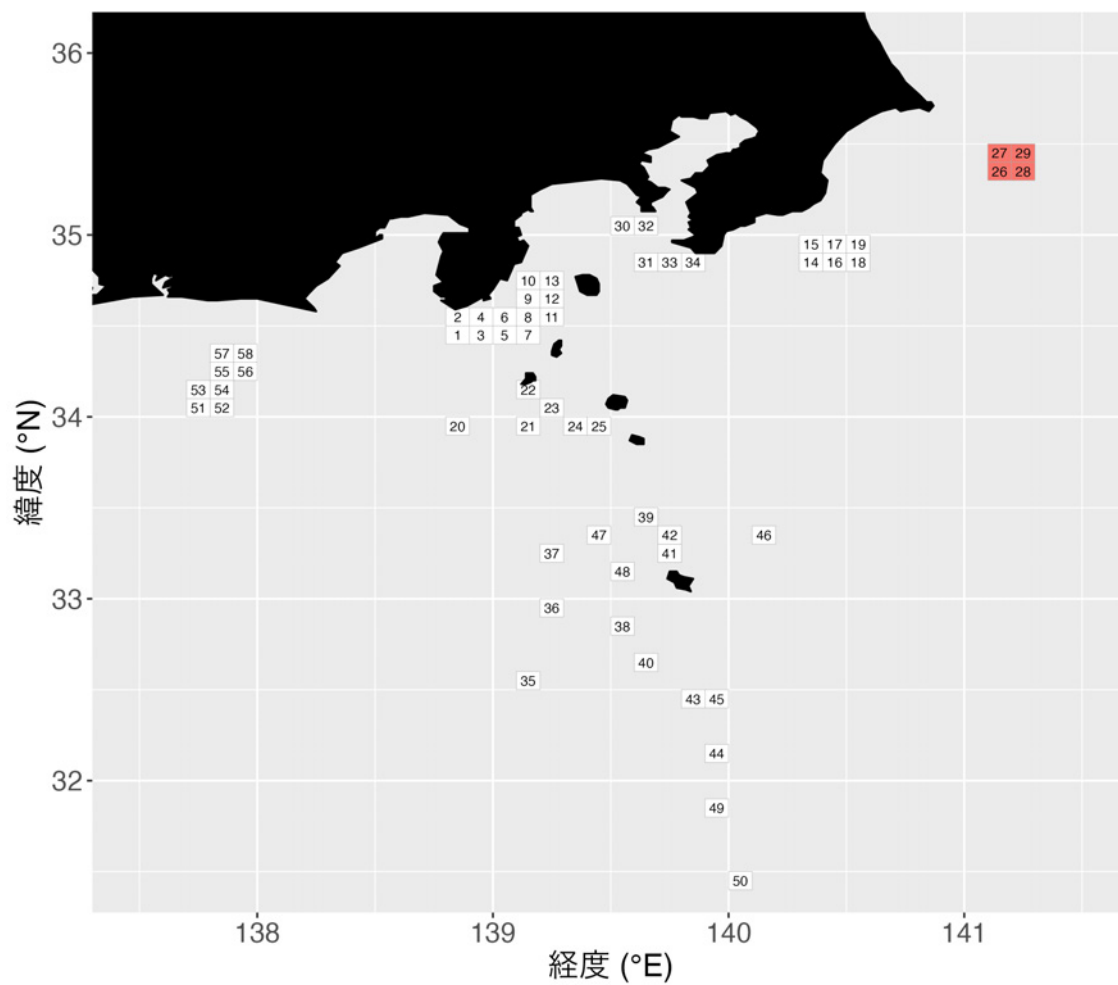


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。銚子地区は26～29番のグリッドを使用。

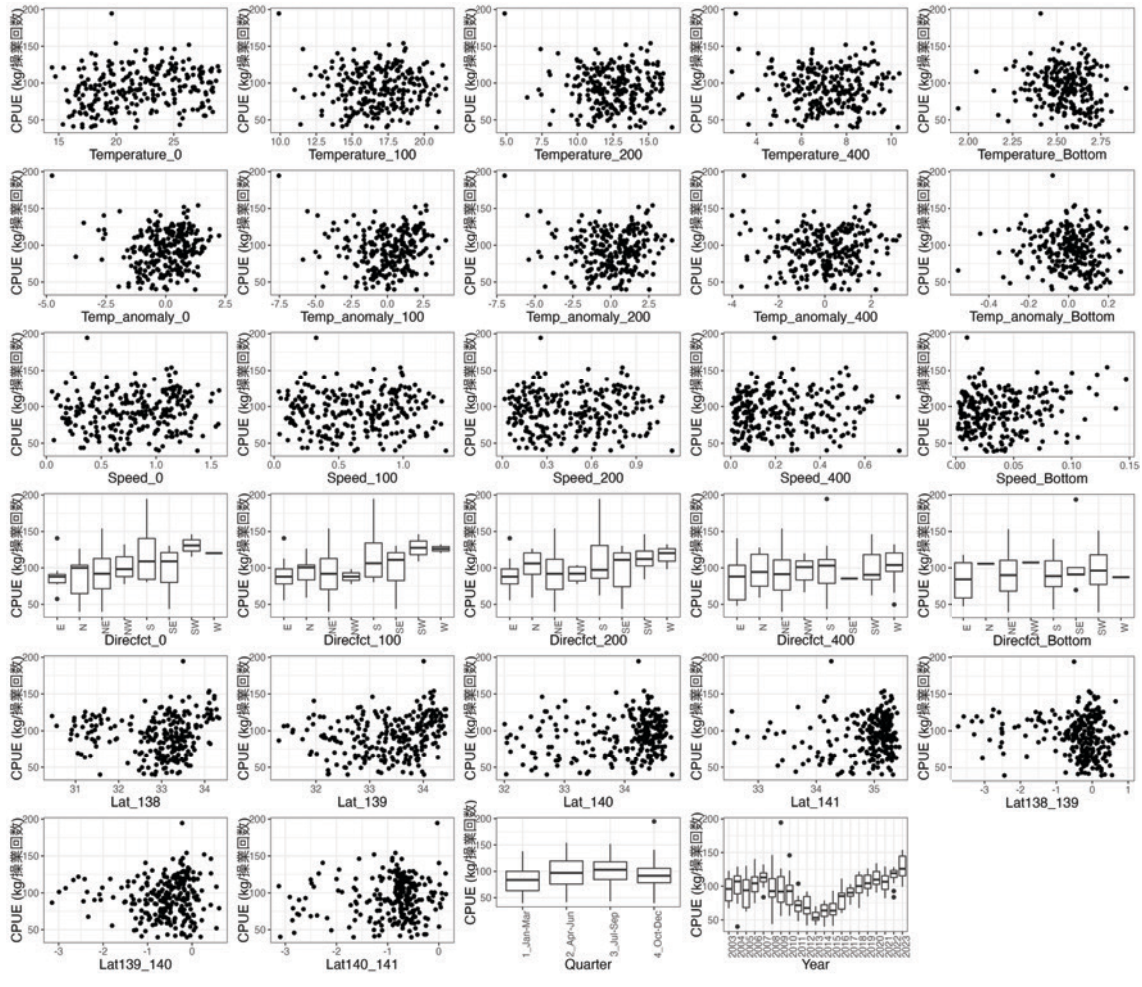


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

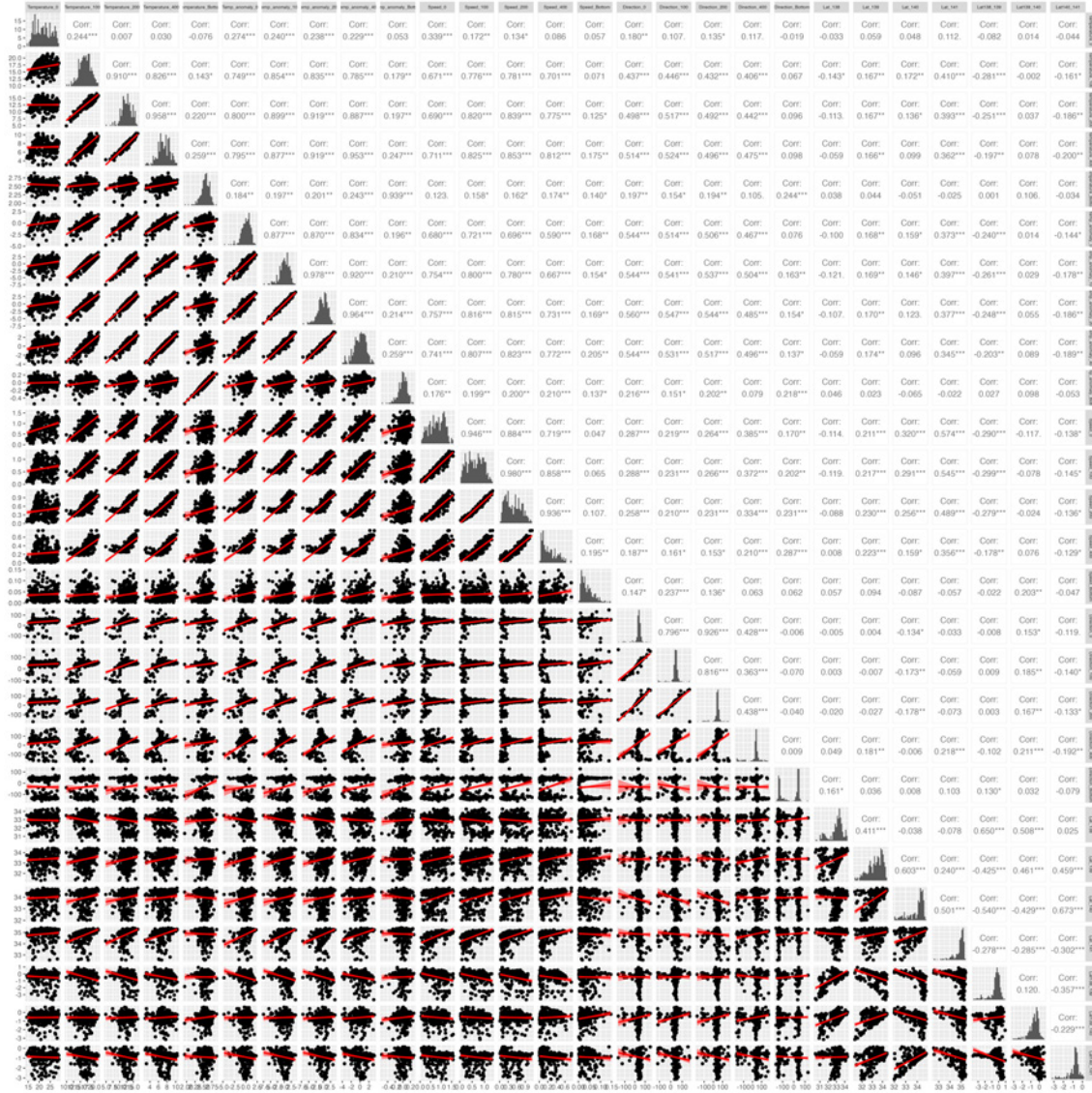


図3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

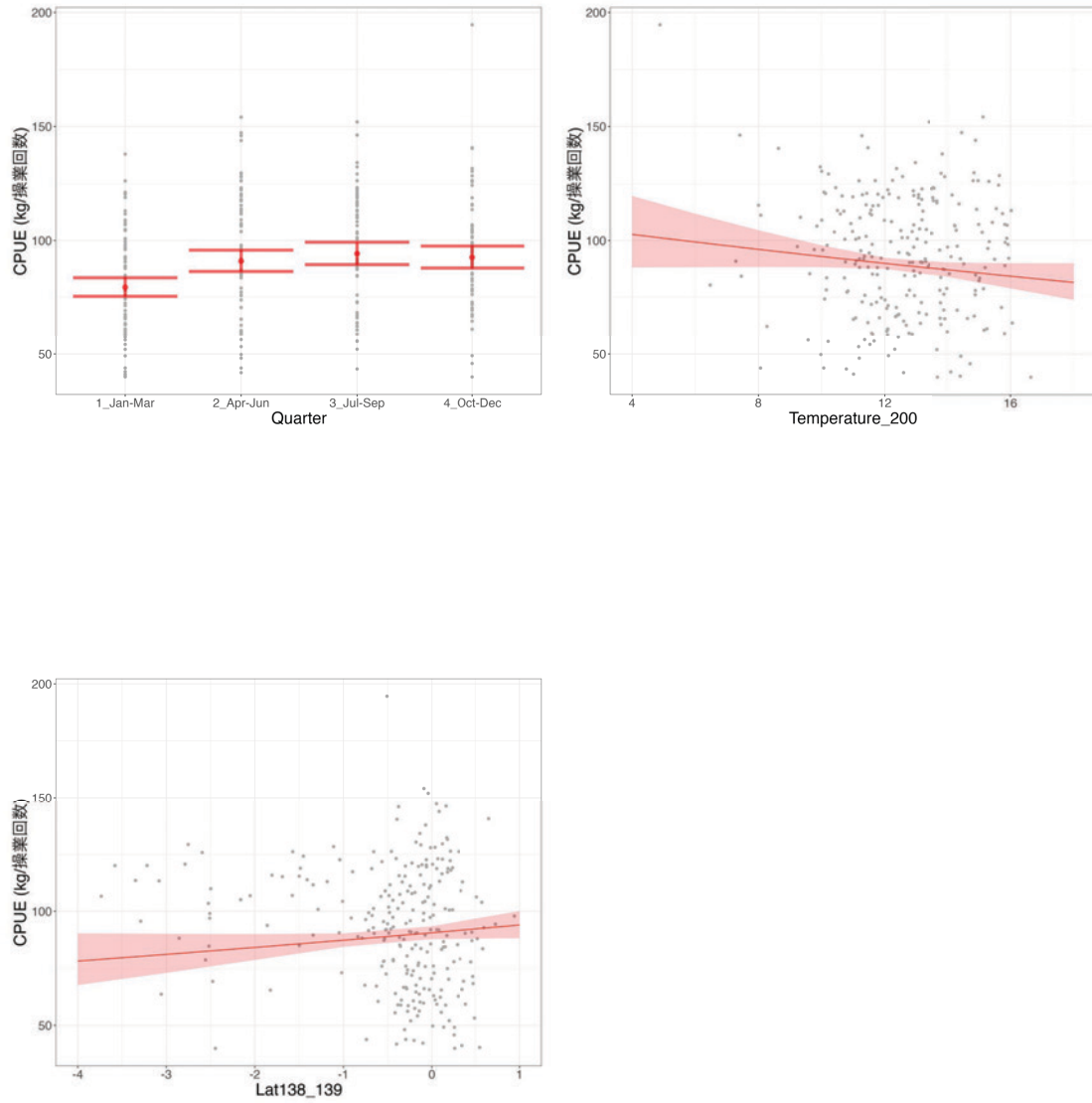


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

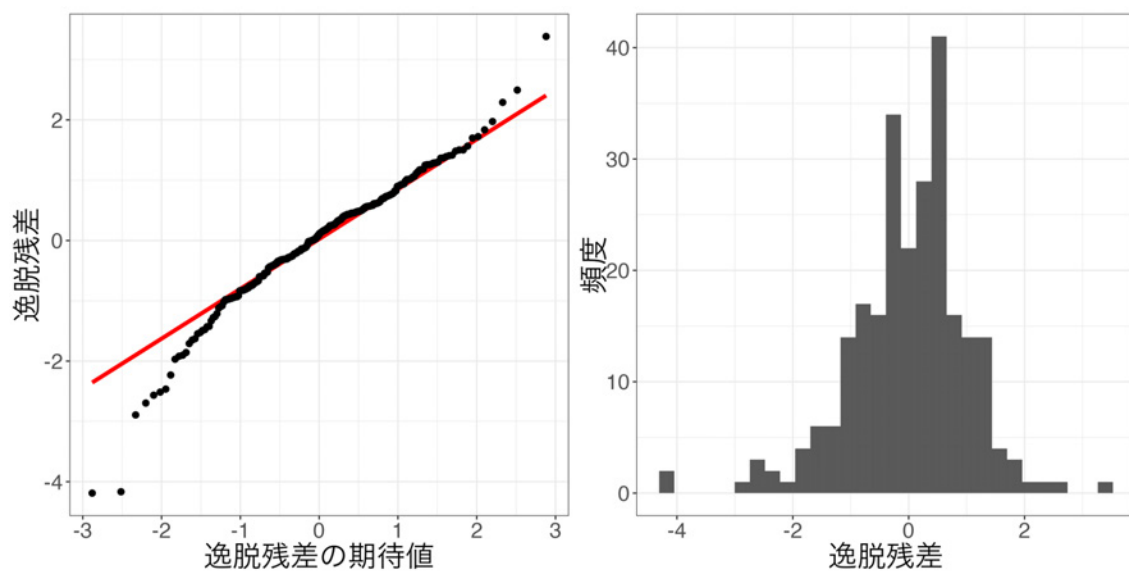


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

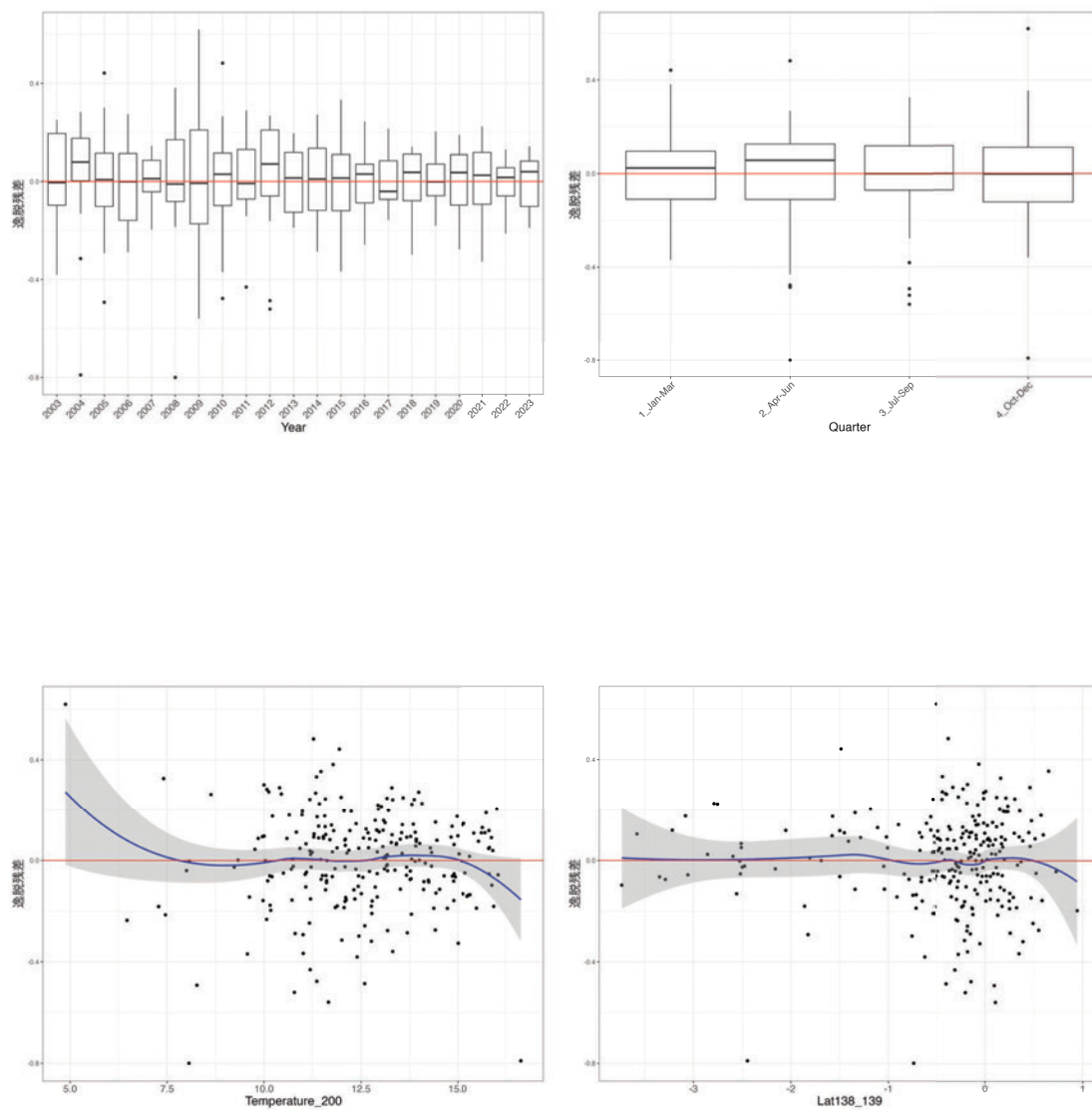


図 6. ベストモデルの層別逸脱残差 Temperature_200、Lat138_139 に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

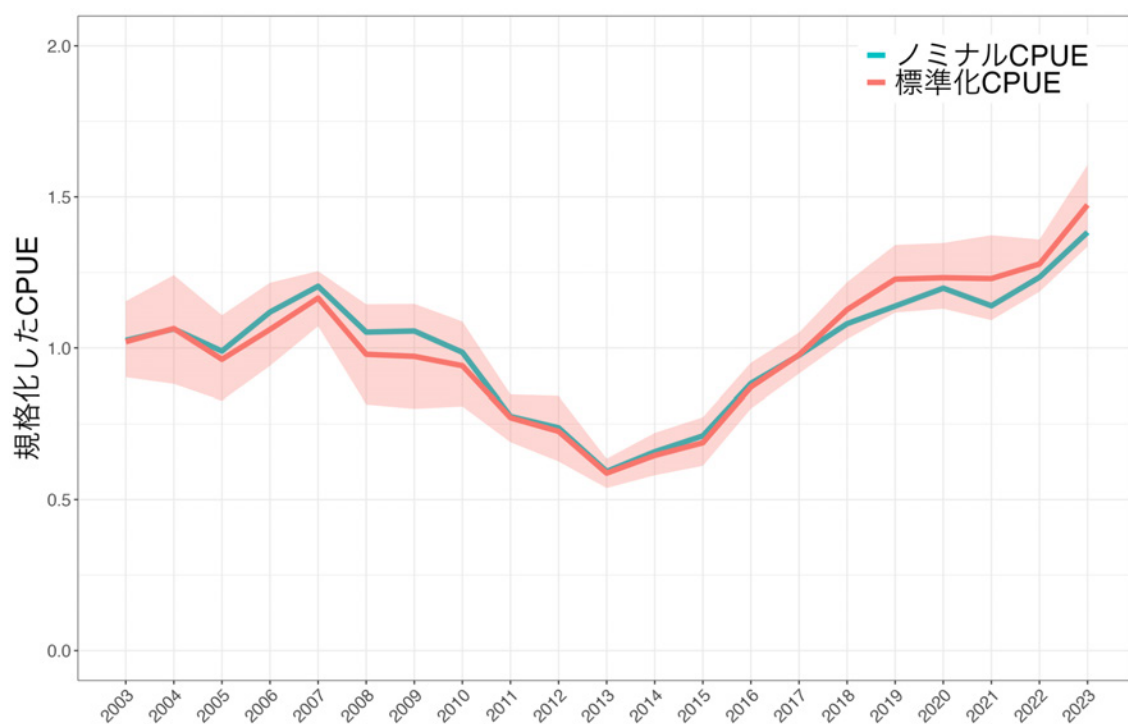


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Lat138_139 + Quarter + Temperature_200 + Year + 1, family = gaussian, data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	4.647	0.132	35.141	0.0000	***
Lat138_139	0.037	0.020	1.813	0.0711	.
Quarter2_Apr-Jun	0.135	0.037	3.636	0.0003	***
Quarter3_Jul-Sep	0.170	0.038	4.510	0.0000	***
Quarter4_Oct-Dec	0.153	0.036	4.197	0.0000	***
Temperature_200	-0.017	0.009	-1.858	0.0644	.
Year2004	0.042	0.085	0.492	0.6230	
Year2005	-0.059	0.084	-0.694	0.4886	
Year2006	0.039	0.086	0.454	0.6499	
Year2007	0.133	0.085	1.566	0.1188	
Year2008	-0.041	0.085	-0.488	0.6261	
Year2009	-0.049	0.085	-0.575	0.5658	
Year2010	-0.081	0.084	-0.966	0.3350	
Year2011	-0.281	0.083	-3.379	0.0009	***
Year2012	-0.341	0.083	-4.093	0.0001	***
Year2013	-0.552	0.083	-6.622	0.0000	***
Year2014	-0.457	0.083	-5.491	0.0000	***
Year2015	-0.394	0.084	-4.718	0.0000	***
Year2016	-0.158	0.083	-1.897	0.0592	.
Year2017	-0.043	0.083	-0.520	0.6036	
Year2018	0.099	0.085	1.165	0.2451	
Year2019	0.185	0.089	2.081	0.0386	*
Year2020	0.189	0.084	2.245	0.0258	*
Year2021	0.186	0.087	2.141	0.0333	*

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
Year2022	0.225	0.084	2.682	0.0079	**
Year2023	0.367	0.086	4.282	0.0000	***

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.04138918)

Null deviance: 23.4 on 251 degrees of freedom

Residual deviance: 9.354 on 226 degrees of freedom

AIC: -60.85

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名		変数略記
年		Year
季節		Quarter
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(千葉県・勝浦地区)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある千葉県勝浦地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS IIから取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2000～2023年
標準化に使用した期間	2000～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS IIから取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、0m層水温、0m層流速、100m層流向、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経140度-141度)
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	標準化CPUEは2007年から2013年にかけて長期的減少傾向を示したのち、2017年まで横ばい傾向であったが、2018年以降は最近年まで増加傾向を示しており、2023年は解析期間内の最高値を更新した。ノミナルCPUEでも同様のトレンドがみられたが、2002～2005年、2010年、2017年以降は標準化CPUEのほうが高く、それ以外の年はノミナルCPUEのほうが高い結果となった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。千葉県の勝浦地区のデータを用いて推定を行った結果、黒潮や漁場内の流速の影響による CPUE の低下が補正され、モデル診断結果も概ね良好であったことから、このモデルから得られた年トレンドを、キンメダイ太平洋系群の VPA のチューニング指数の 1 つとして利用することとなった。

今年度も昨年度までに引き続き、最新年のデータを追加した上で千葉県勝浦地区の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある千葉県の勝浦地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2000～2023 年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM（log-normal GLM）である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に

影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁（流軸から 13 海里）の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した (Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141)。勝浦地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 140 度における黒潮北縁緯度 (Lat_140) を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差（すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141) を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日: 2024 年 4 月 4 日) における深度帯別 (0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層) の水温 (Temperature)、流向 (Direction)、流速 (Speed) の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、勝浦地区では図 1 の 14~19 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数 (Direcftct) に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係性をプロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと (図 2)、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果 (Year)、季節効果 (Quarter: 12 ヶ月を 1~3 月、4~6 月、7~9 月、10~12 月に 4 等分) については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \log(\text{CPUE}) \sim & \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{200} + \text{Temperature}_{400} + \text{Temperature}_{\text{Bottom}} \\ & + \\ & \text{Speed}_0 + \text{Speed}_{100} + \text{Speed}_{200} + \text{Speed}_{400} + \text{Speed}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Direcftct}_0 + \text{Direcftct}_{100} + \text{Direcftct}_{200} + \text{Direcftct}_{400} + \text{Direcftct}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Lat}_{140} + \\ & \text{Lat138}_{139} + \text{Lat139}_{140} + \text{Lat140}_{141} \end{aligned}$$

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準 (AIC) によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル (例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの) は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された (表 1)。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Temperature}_0 + \text{Speed}_0 + \text{Dirfcct}_{100} + \text{Lat140}_{141}$$

勝浦地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 5 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小 AIC+2 の範囲の他のモデルをみると、ベストモデルの説明変数に加え、多くのモデルで黒潮北縁位置が選ばれており、黒潮の影響や漁場内の海洋環境に関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数への CPUE の応答 (図 4) からも、黒潮入込、流れ、の強弱、水温の強弱による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった (図 5)。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった (図 6)。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は 2007 年から 2013 年にかけて長期的減少傾向を示したのち、2017 年まで横ばい傾向であったが、2018 年以降は最近年まで増加傾向を示しており、2023 年は解析期間内の最高値を更新した。ノミナル CPUE でも同様のトレンドがみられたが、2002~2005 年、2010 年、2017 年以降は標準化 CPUE のほうが高く、それ以外の年はノミナル CPUE のほうが高い結果となった。

3.2 昨年度結果との比較

今年度のベストモデルで選択された説明変数は、昨年度のものと同様であり、ベストモデルから得られた標準化 CPUE とのトレンドに昨年度との大きな違いはなかった。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf
- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和 3 (2021) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和 3 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもの
のうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向					黒潮北緯緯度			経度間の黒潮北緯の緯度差			流速					水温					季節	年	df	logLik	AIC	delta
	0	100	200	400	底	東経140度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	400	底	0	100	200	400	底								
2.14		+				0.06			-0.11	-0.23					-0.04						+	+	37	107.9	-141.7	0.0	
4.12		+							-0.08	-0.18					-0.04						+	+	36	106.7	-141.4	0.3	
1.83	+					0.07			-0.12	-0.23					-0.04						+	+	37	107.2	-140.3	1.4	
2.16		+				0.06	0		-0.11	-0.23					-0.04						+	+	38	107.9	-139.8	1.9	
2.17		+				0.06		0	-0.11	-0.23					-0.04						+	+	38	107.9	-139.7	2.0	

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2000	1.09	1.01	0.89	1.13	0.06
2001	1.30	1.19	1.07	1.30	0.05
2002	1.02	1.06	1.01	1.11	0.03
2003	0.98	1.05	0.98	1.13	0.04
2004	0.97	1.04	0.95	1.13	0.04
2005	1.09	1.17	1.06	1.27	0.05
2006	1.21	1.20	0.99	1.38	0.09
2007	1.23	1.16	1.02	1.34	0.07
2008	1.16	1.06	0.96	1.19	0.05
2009	1.13	0.99	0.89	1.12	0.06
2010	1.00	1.02	0.91	1.13	0.06
2011	0.83	0.83	0.76	0.90	0.04
2012	0.95	0.92	0.80	1.06	0.07
2013	0.78	0.70	0.63	0.77	0.05
2014	0.79	0.74	0.68	0.80	0.04
2015	0.82	0.77	0.68	0.85	0.06
2016	0.83	0.78	0.68	0.91	0.07
2017	0.71	0.73	0.66	0.81	0.05
2018	0.81	0.90	0.80	1.01	0.06
2019	0.76	0.85	0.74	0.96	0.07
2020	1.03	1.09	1.00	1.19	0.04
2021	1.00	1.09	1.00	1.17	0.04
2022	1.24	1.31	1.17	1.47	0.06
2023	1.27	1.35	1.15	1.57	0.08

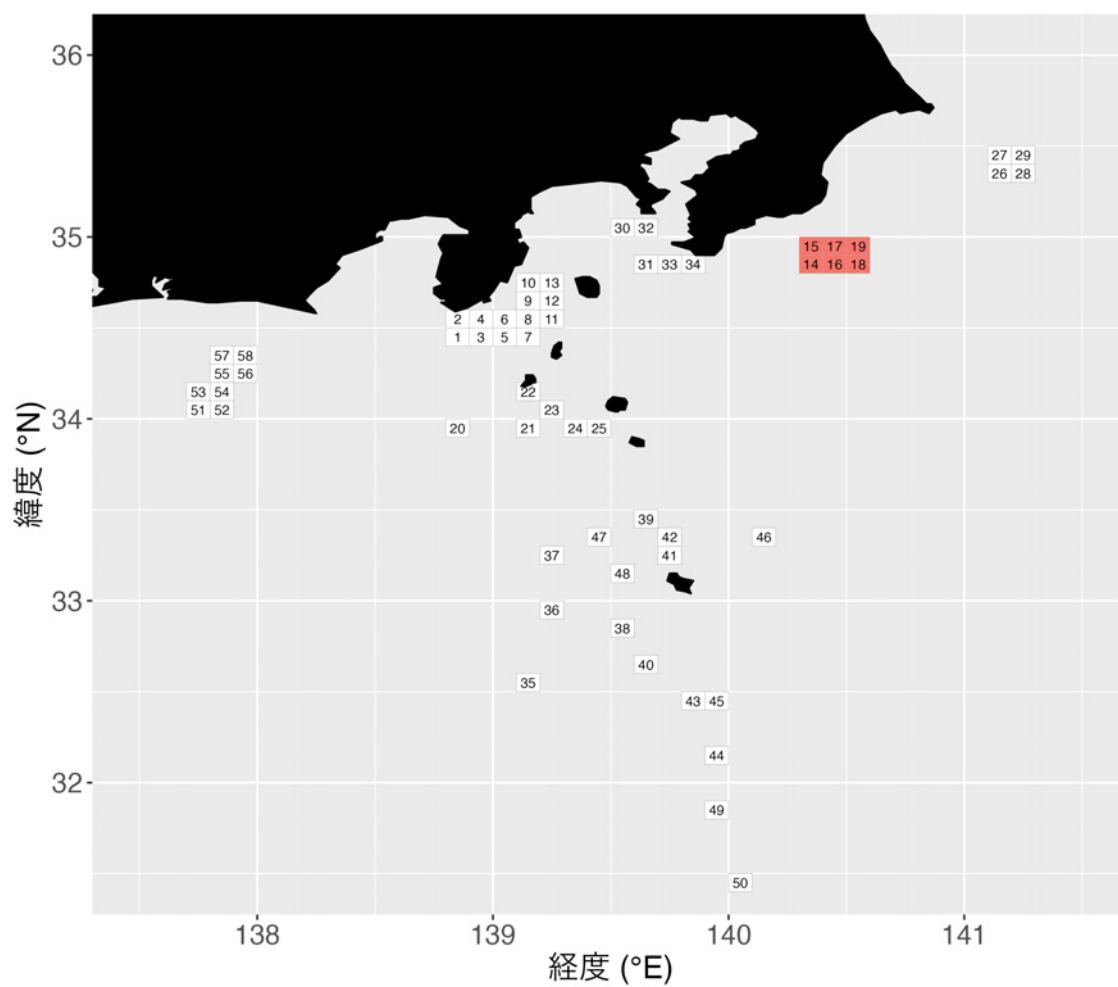


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。勝浦地区は14～19番のグリッドを使用。

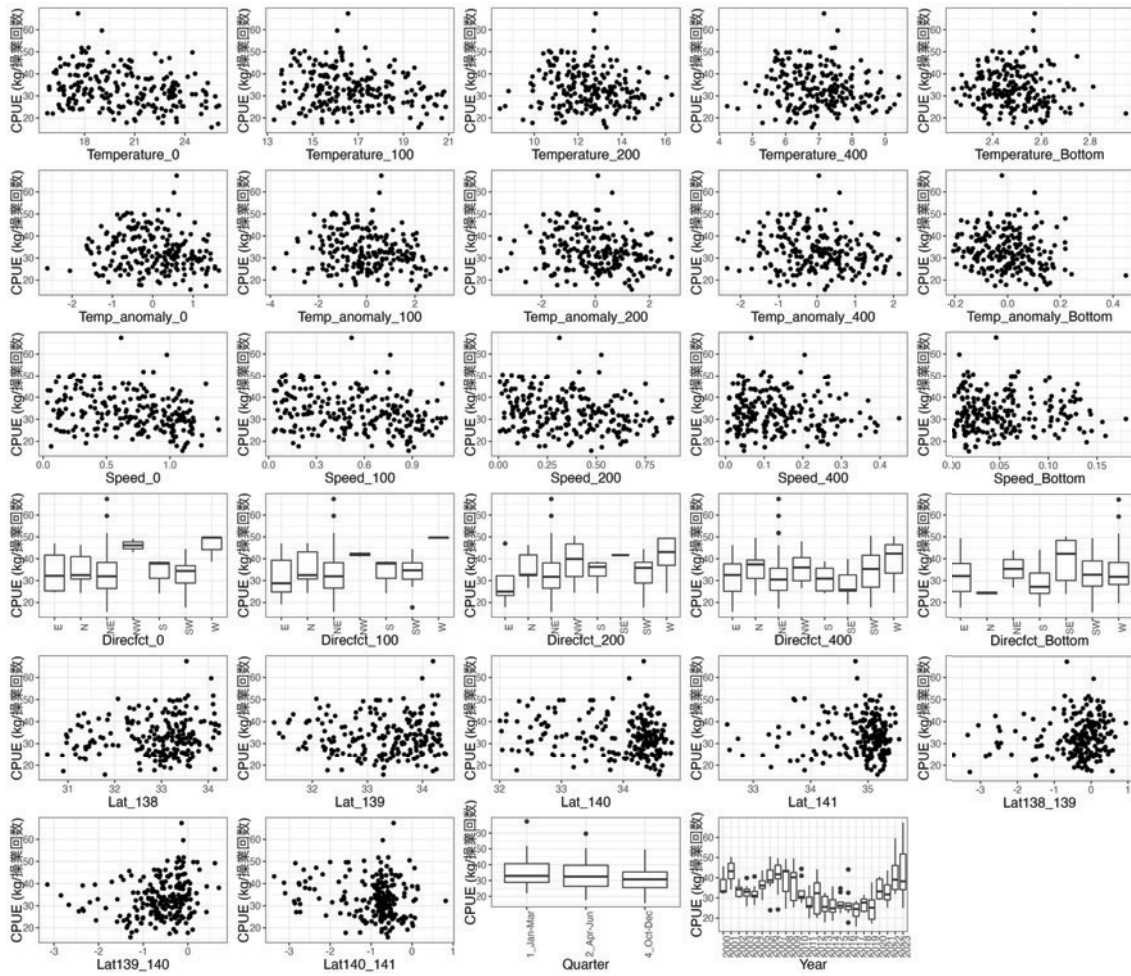


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

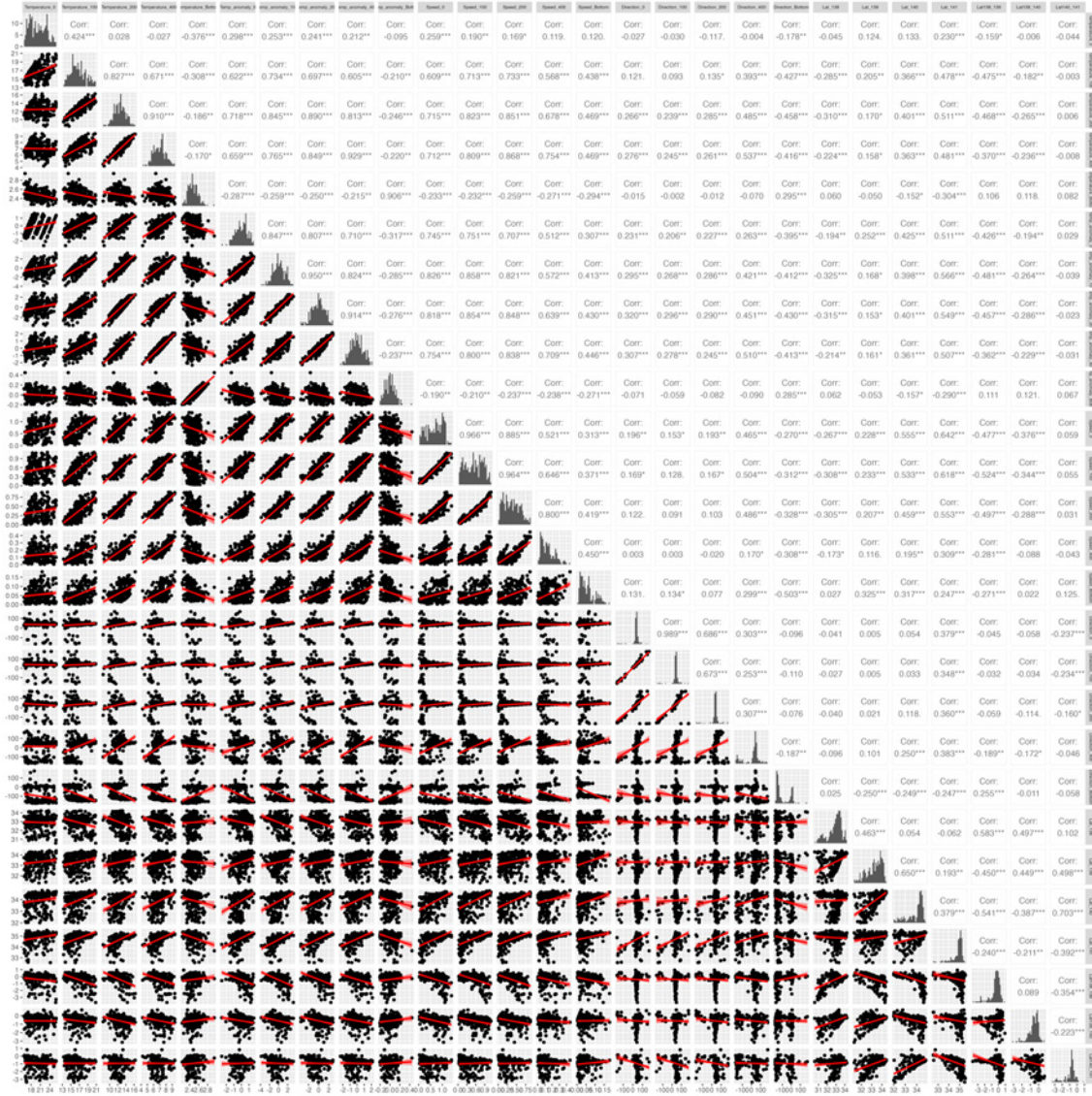


図3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

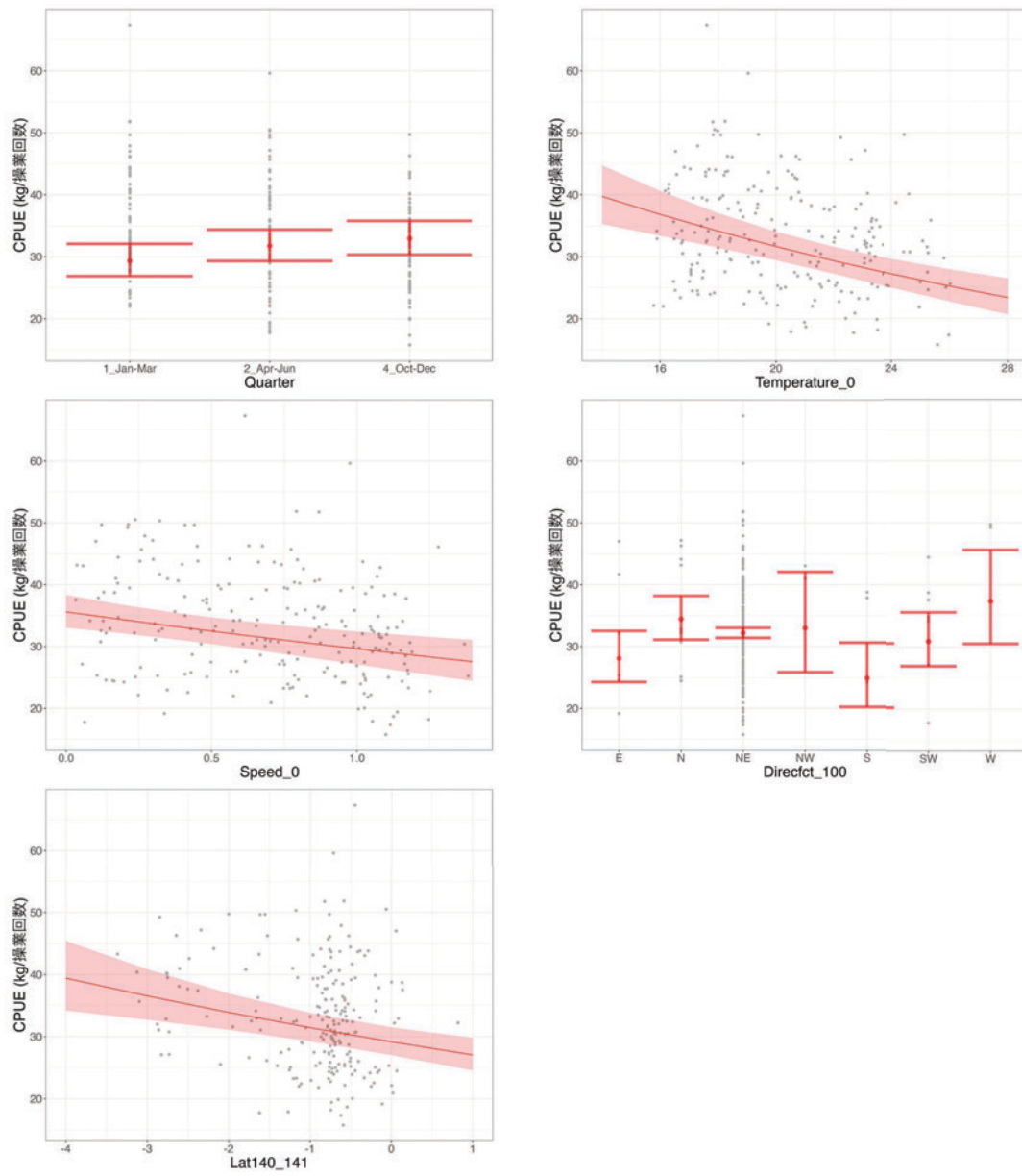


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

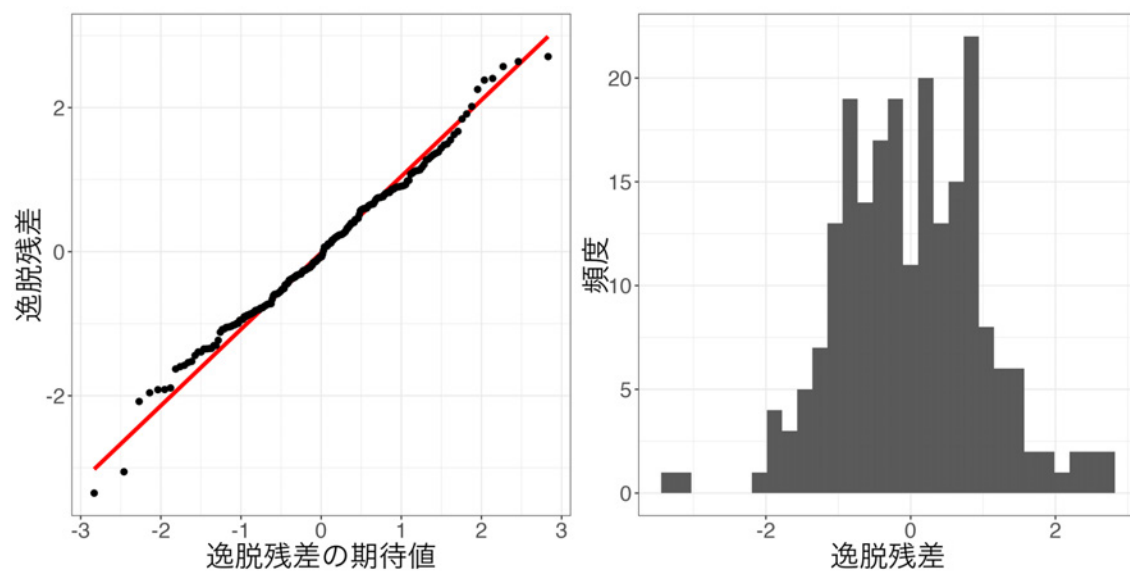


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

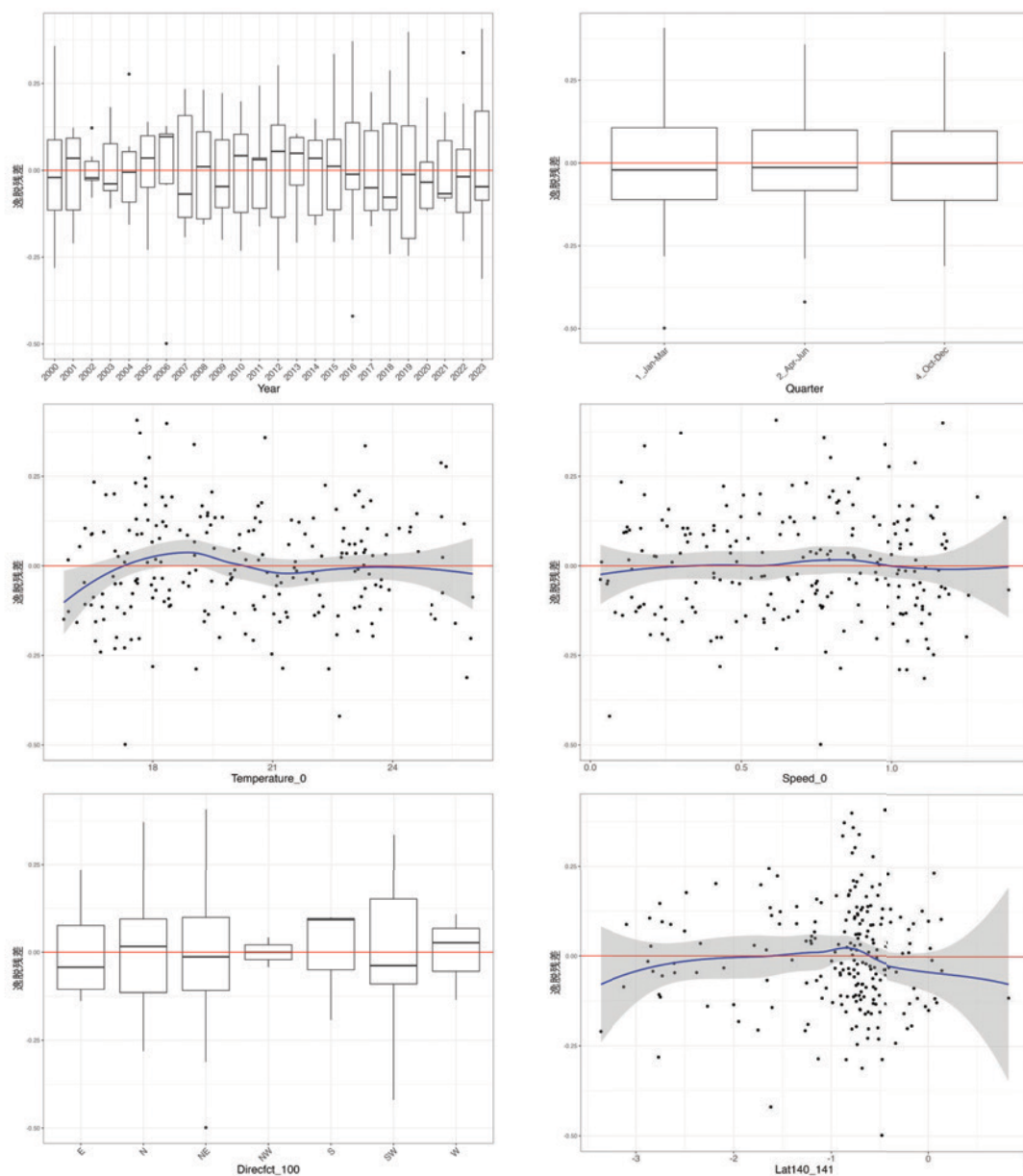


図6. ベストモデルの層別逸脱残差 Temperature_0、Speed_0、Lat140_141に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

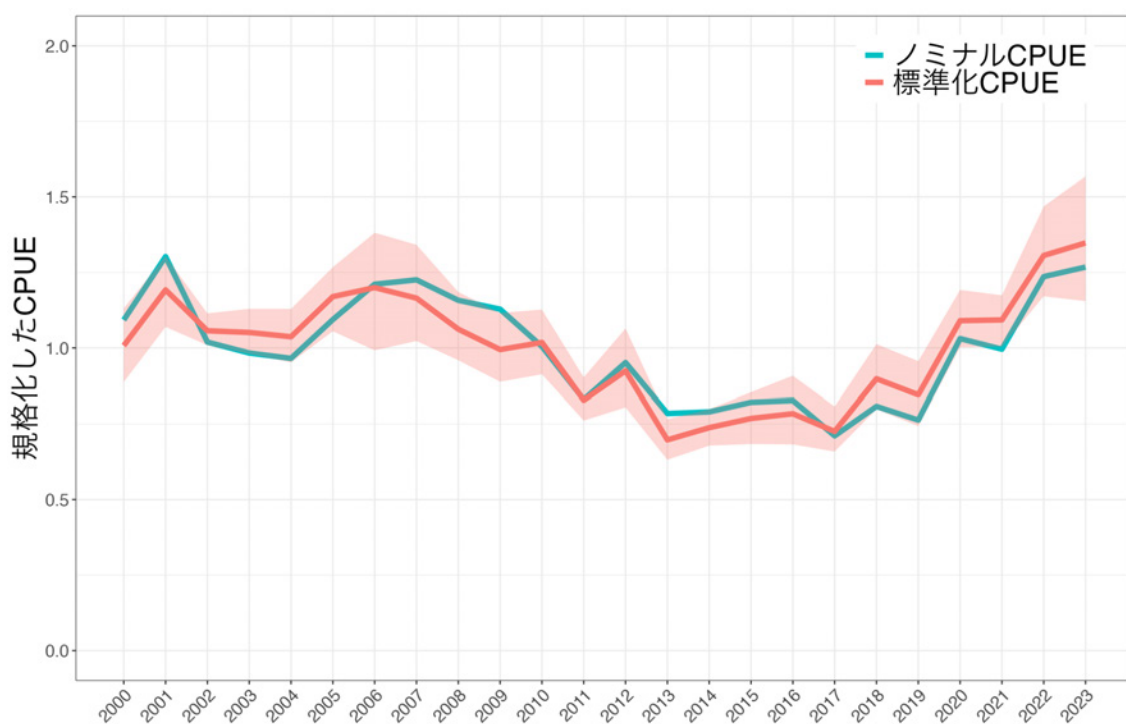


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Direcft_100 + Lat140_141 + Quarter + Speed_0 + Temperature_0 + Year + 1, family = gaussian, data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	4.121	0.150	27.401	0.0000	***
Direcft_100N	0.205	0.089	2.313	0.0219	*
Direcft_100NE	0.137	0.077	1.781	0.0765	.
Direcft_100NW	0.161	0.143	1.122	0.2632	
Direcft_100S	-0.121	0.121	-0.999	0.3193	
Direcft_100SW	0.097	0.098	0.992	0.3225	
Direcft_100W	0.285	0.120	2.376	0.0185	*
Lat140_141	-0.075	0.019	-3.966	0.0001	***
Quarter2_Apr-Jun	0.078	0.035	2.227	0.0272	*
Quarter4_Oct-Dec	0.115	0.045	2.554	0.0115	*
Speed_0	-0.183	0.050	-3.658	0.0003	***
Temperature_0	-0.038	0.007	-5.334	0.0000	***
Year2001	0.168	0.079	2.130	0.0345	*
Year2002	0.048	0.078	0.611	0.5421	
Year2003	0.042	0.079	0.539	0.5904	
Year2004	0.029	0.079	0.365	0.7152	
Year2005	0.149	0.079	1.894	0.0599	.
Year2006	0.175	0.082	2.121	0.0353	*
Year2007	0.145	0.081	1.799	0.0736	.
Year2008	0.053	0.078	0.679	0.4982	
Year2009	-0.013	0.077	-0.168	0.8666	
Year2010	0.010	0.079	0.131	0.8957	
Year2011	-0.196	0.078	-2.531	0.0122	*
Year2012	-0.086	0.077	-1.113	0.2673	

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
Year2013	-0.368	0.077	-4.802	0.0000	***
Year2014	-0.311	0.076	-4.081	0.0001	***
Year2015	-0.271	0.076	-3.545	0.0005	***
Year2016	-0.251	0.077	-3.270	0.0013	**
Year2017	-0.328	0.078	-4.184	0.0000	***
Year2018	-0.115	0.080	-1.431	0.1541	
Year2019	-0.175	0.081	-2.176	0.0309	*
Year2020	0.079	0.078	1.009	0.3144	
Year2021	0.081	0.080	1.017	0.3105	
Year2022	0.259	0.079	3.303	0.0012	**
Year2023	0.291	0.079	3.659	0.0003	***

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.02601072)

Null deviance: 14.27 on 215 degrees of freedom

Residual deviance: 4.708 on 181 degrees of freedom

AIC: -141.44

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名	変数略記	
年	Year	
季節	Quarter	
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(千葉県・東京湾口部)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	東京湾口部においてキンメダイの漁獲がある千葉県籍船の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2000～2023年
標準化に使用した期間	2000～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC 総当たり法ののち、最小 AIC+2 の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS II から取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経 138 度-139 度)、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経 139 度-140 度)
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を 1,000 回繰り返した。
標準化の結果	標準化 CPUE は 2007 年から 2012 年にかけて減少、2013 年に増加した。その後は大きな増減を繰り返し、2019 年以降は低水準にある。ただし、2021 年以降はゆるやかな増加傾向にあり、2023 年も前年から増加した。ノミナル CPUE でも同様のトレンドだが、2000 年、2003～2006 年、2018 年は標準化 CPUE のほうが顕著に高かった。それ以外の多くの年はノミナル CPUE のほうが高い結果となった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。その結果、東京湾口部における千葉県籍船のデータによる標準化 CPUE は、環境要因による影響がより考慮されていると判断されたこと、モデル診断結果も概ね良好であったことから、VPA のチューニング指数の一つとして導入することとなった。

今年度も昨年度に引き続き、最新年のデータを追加した上で東京湾口部における千葉県籍船による CPUE の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある千葉県の東京湾口部の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2000～2023 年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM（log-normal GLM）である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に

影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁（流軸から 13 海里）の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した（Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141）。東京湾口部では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 140 度における黒潮北縁緯度（Lat_140）を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差（すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141）を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日：2024 年 4 月 4 日) における深度帯別（0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層）の水温（Temperature）、流向（Direction）、流速（Speed）の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、東京湾口部における千葉県籍船は野島崎東側での操業が多いことから、図 1 の 33、34 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数（Direcfct）に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係プロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと（図 2）、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果（Year）、季節効果（Quarter: 12 ヶ月を 1～3 月、4～6 月、7～9 月、10～12 月に 4 等分）については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \log(\text{CPUE}) \sim & \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{200} + \text{Temperature}_{400} + \text{Temperature}_{\text{Bottom}} \\ & + \\ & \text{Speed}_0 + \text{Speed}_{100} + \text{Speed}_{200} + \text{Speed}_{400} + \text{Speed}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Direcfct}_0 + \text{Direcfct}_{100} + \text{Direcfct}_{200} + \text{Direcfct}_{400} + \text{Direcfct}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Lat}_{140} + \\ & \text{Lat138}_{139} + \text{Lat139}_{140} + \text{Lat140}_{141} \end{aligned}$$

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準（AIC）によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル（例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの）は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された（表 1）。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Lat138_139} + \text{Lat139_140}$$

東京湾口地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 30 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小 AIC+2 の範囲の他のモデルをみると、多くのモデルで共通して黒潮入込や流向・流速等が含まれており、黒潮の影響や漁場内の流れに関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数への CPUE の応答（図 4）からも、黒潮入込の強弱による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった（図 5）。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった（図 6）。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は 2007 年から 2012 年にかけて減少傾向にあったが、2013 年に増加した。その後は大きな増減を繰り返したが、2019 年以降は低水準にある。ただし、2021 年以降はゆるやかな増加傾向にあり、2023 年も前年から増加した。ノミナル CPUE でも同様のトレンドだが、2000 年、2003～2006 年、2018 年は標準化 CPUE のほうが顕著に高かった。それ以外の多くの年はノミナル CPUE のほうが高い結果となった。

3.2 昨年度結果との比較

昨年度と同様、東経 139～140 度における黒潮北縁の緯度差と季節効果がベストモデルに含まれた。一方、昨年度ベストモデルに含まれなかった東経 138～139 度における黒潮北縁の緯度差が今年度は含まれたが、昨年度含まれた 0 m 流速が今年度は含まれていなかった。しかし、いずれの年度でも最小 AIC+2 の多くのモデルにこれらの流速や黒潮北縁の緯度差が含まれており、ベストモデルに基づく標準化 CPUE の年トレンドの変化も小さいことから、1 年分データが追加されたことによるモデル推定結果の大きな変化はなかったと判断できる。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の

漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf

- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和3(2021)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和3年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもの
のうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向					黒潮北緯緯度 東経140度	経度間の黒潮北緯の緯度差			流速					水温					季節	年	df	logLik	AIC	delta				
	0	100	200	400	底		138-139	139-140	140-141	0	100	200	400	底	0	100	200	400	底										
4.74					+		0.27	0.36														+	+	35	-409.1	888.2	0.0		
5.10					+		0.31	0.41	0.15														+	+	36	-408.1	888.3	0.0	
5.20					+		0.28	0.35	0.15	-0.79													+	+	37	-407.4	888.8	0.5	
4.83					+		0.24	0.31		-0.79													+	+	36	-408.4	888.8	0.6	
12.68					+	-0.23	0.26	0.31	0.25														+	+	37	-407.5	888.9	0.7	
5.11			+				0.29	0.42	0.17														+	+	38	-406.7	889.3	1.1	
4.67							0.26	0.38														+	+	30	-414.7	889.3	1.1		
4.90							0.31	0.42	0.15														+	+	31	-413.7	889.4	1.2	
4.84					+		0.27	0.35						-5.25									+	+	36	-408.8	889.5	1.3	
5.20					+		0.32	0.40	0.15					-5.20									+	+	37	-407.8	889.5	1.3	
4.83			+				0.24	0.38															+	+	37	-407.8	889.7	1.4	
5.18					+		0.30	0.37	0.15	-0.81													+	+	37	-407.9	889.7	1.5	
4.82					+		0.25	0.33		-0.80													+	+	36	-408.9	889.7	1.5	
4.05					+		0.32	0.43	0.16														0.14	+	+	37	-407.9	889.8	1.5
4.17					+		0.32	0.42	0.15														0.13	+	+	37	-407.9	889.9	1.6
3.83					+		0.28	0.38															0.12	+	+	36	-408.9	889.9	1.6
3.88					+		0.27	0.38															0.12	+	+	36	-409.0	889.9	1.7
5.05					+		0.31	0.41	0.16				1.45										+	+	37	-408.0	890.0	1.7	
11.12					+	-0.18	0.25	0.28	0.23	-0.64													+	+	38	-407.0	890.0	1.8	
4.49					+		0.32	0.43	0.16															+	+	37	-408.0	890.0	1.8
4.69					+		0.27	0.37					1.22										+	+	36	-409.0	890.0	1.8	
4.76							0.23	0.33		-0.75													+	+	31	-414.0	890.1	1.8	
5.00							0.28	0.37	0.15	-0.75													+	+	32	-413.1	890.1	1.9	
4.80					+		0.32	0.42	0.16															+	+	37	-408.1	890.2	1.9
4.83					+		0.27	0.36						-0.01									+	+	36	-409.1	890.2	2.0	
11.99					+	-0.24	0.27	0.32	0.26														0.17	+	+	38	-407.1	890.2	2.0
4.52					+		0.27	0.37																+	+	36	-409.1	890.2	2.0
4.65					+		0.27	0.37																+	+	36	-409.1	890.2	2.0
5.00					+	-0.01	0.27	0.36															+	+	36	-409.1	890.2	2.0	
4.75					+		0.27	0.36					-0.25										+	+	36	-409.1	890.2	2.0	

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2000	1.22	1.61	1.11	2.11	0.16
2001	2.56	2.06	1.02	3.78	0.33
2002	0.71	0.62	0.27	1.10	0.33
2003	1.31	1.47	0.82	2.39	0.26
2004	0.93	1.44	0.82	2.55	0.31
2005	1.28	2.11	1.46	2.76	0.17
2006	1.90	2.22	1.48	2.98	0.17
2007	1.28	1.34	0.75	2.02	0.24
2008	1.35	1.30	0.71	2.21	0.29
2009	0.75	0.60	0.34	0.91	0.24
2010	0.43	0.45	0.31	0.60	0.17
2011	0.73	0.48	0.25	0.85	0.33
2012	0.41	0.32	0.18	0.59	0.35
2013	0.61	0.47	0.22	0.78	0.31
2014	0.69	0.56	0.29	0.96	0.30
2015	1.20	1.09	0.67	1.61	0.23
2016	1.77	1.22	0.33	2.58	0.47
2017	0.69	0.32	0.13	0.81	0.48
2018	1.06	2.48	1.33	3.91	0.27
2019	0.52	0.35	0.12	0.93	0.56
2020	0.18	0.15	0.09	0.23	0.25
2021	0.36	0.37	0.17	0.73	0.38
2022	0.92	0.35	0.13	0.82	0.48
2023	1.13	0.64	0.25	1.24	0.39

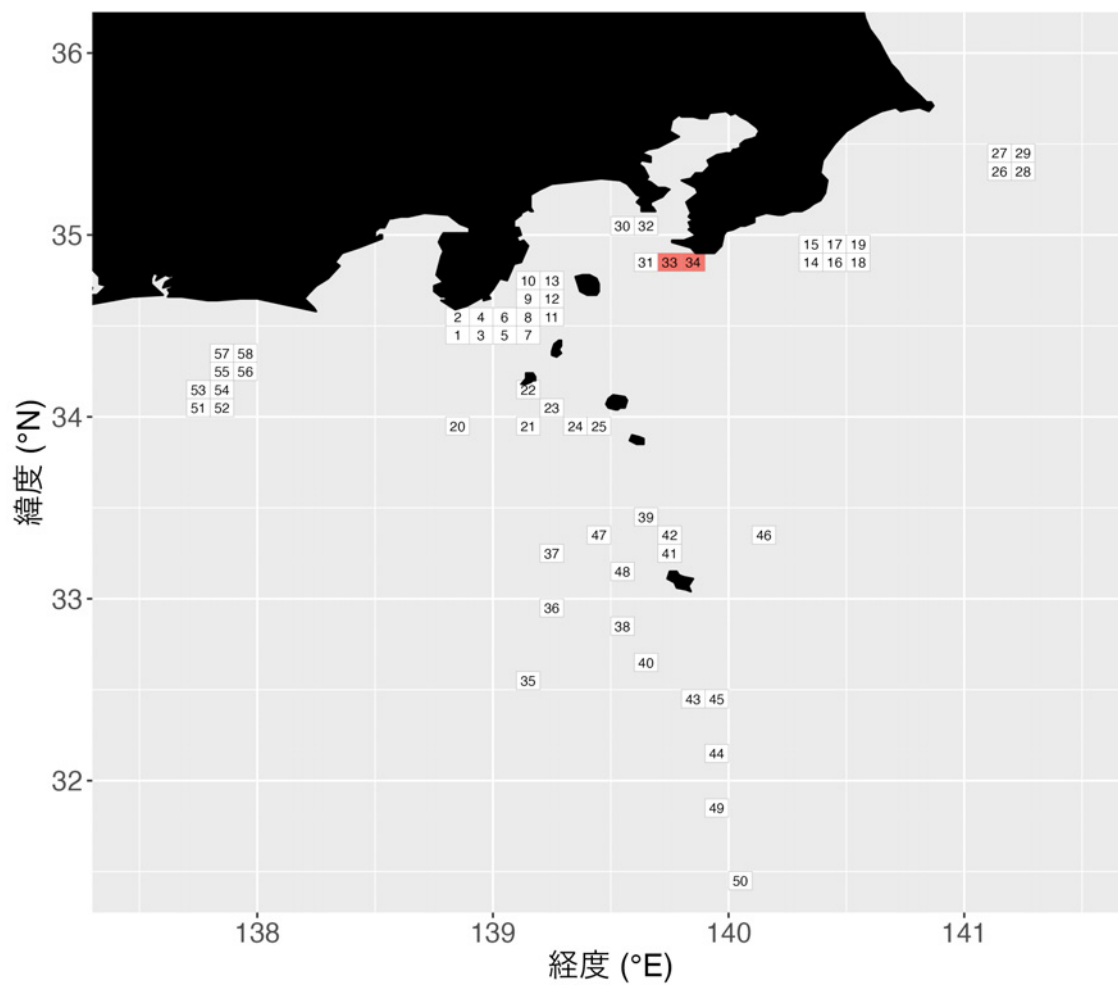


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。東京湾口部は33、34番のグリッドを使用。

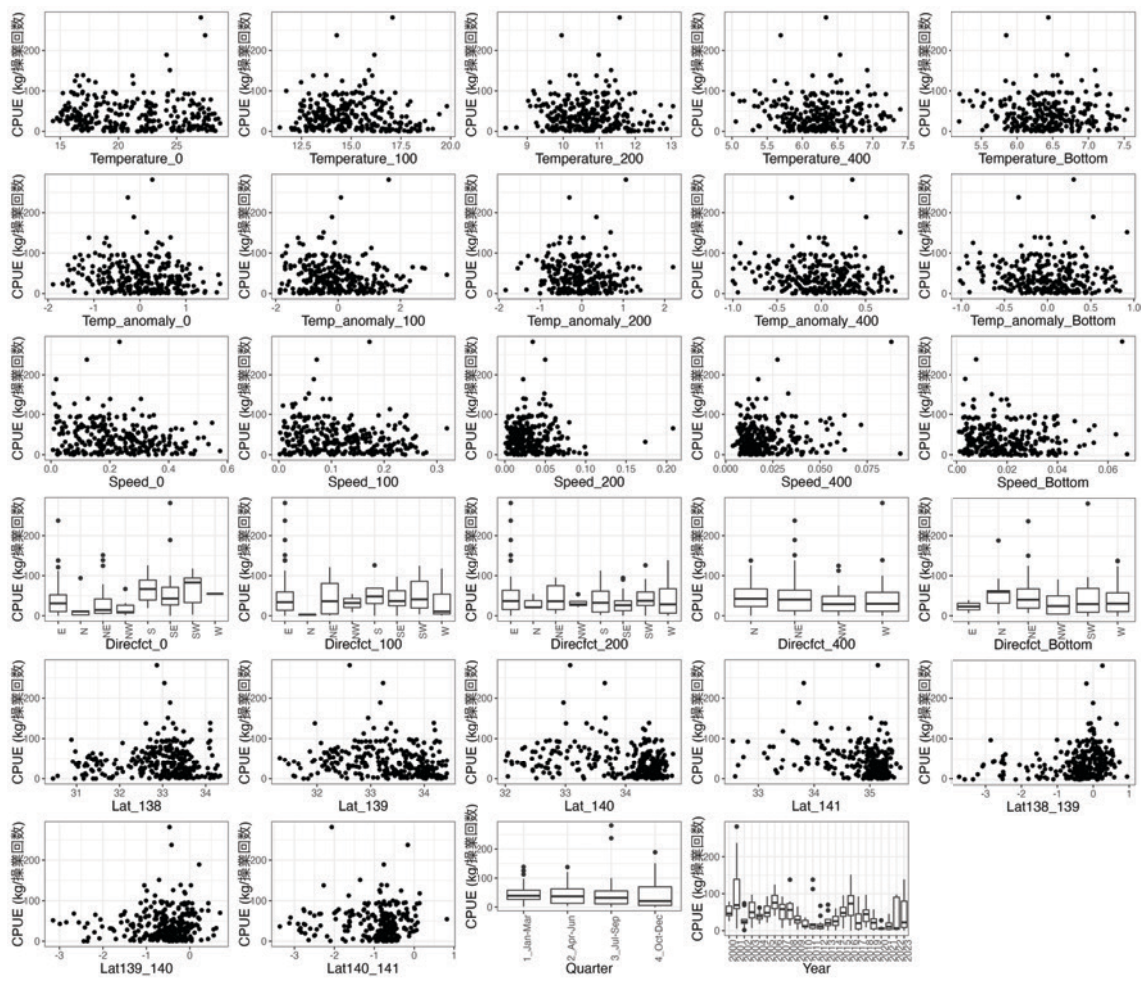


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

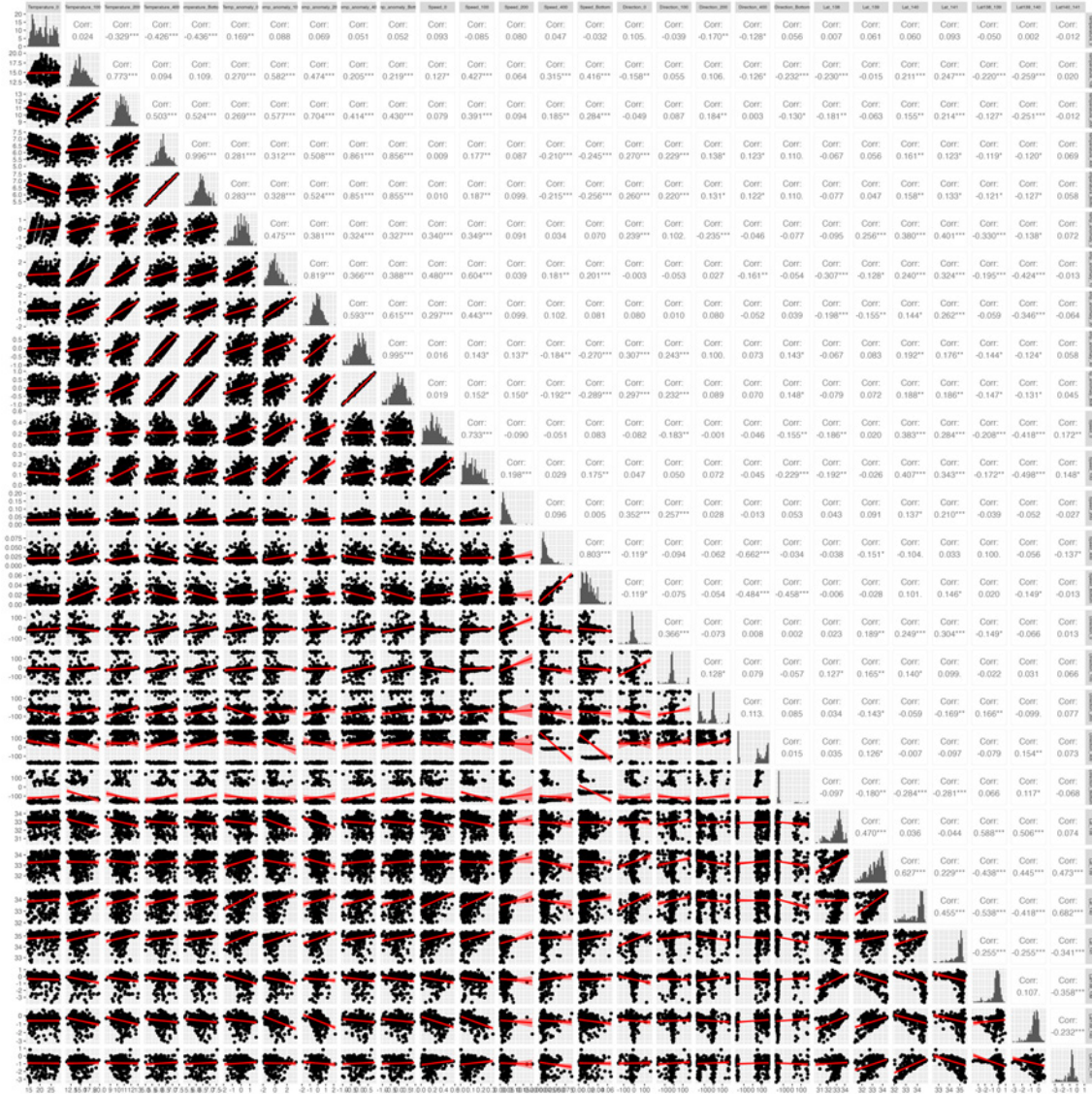


図3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

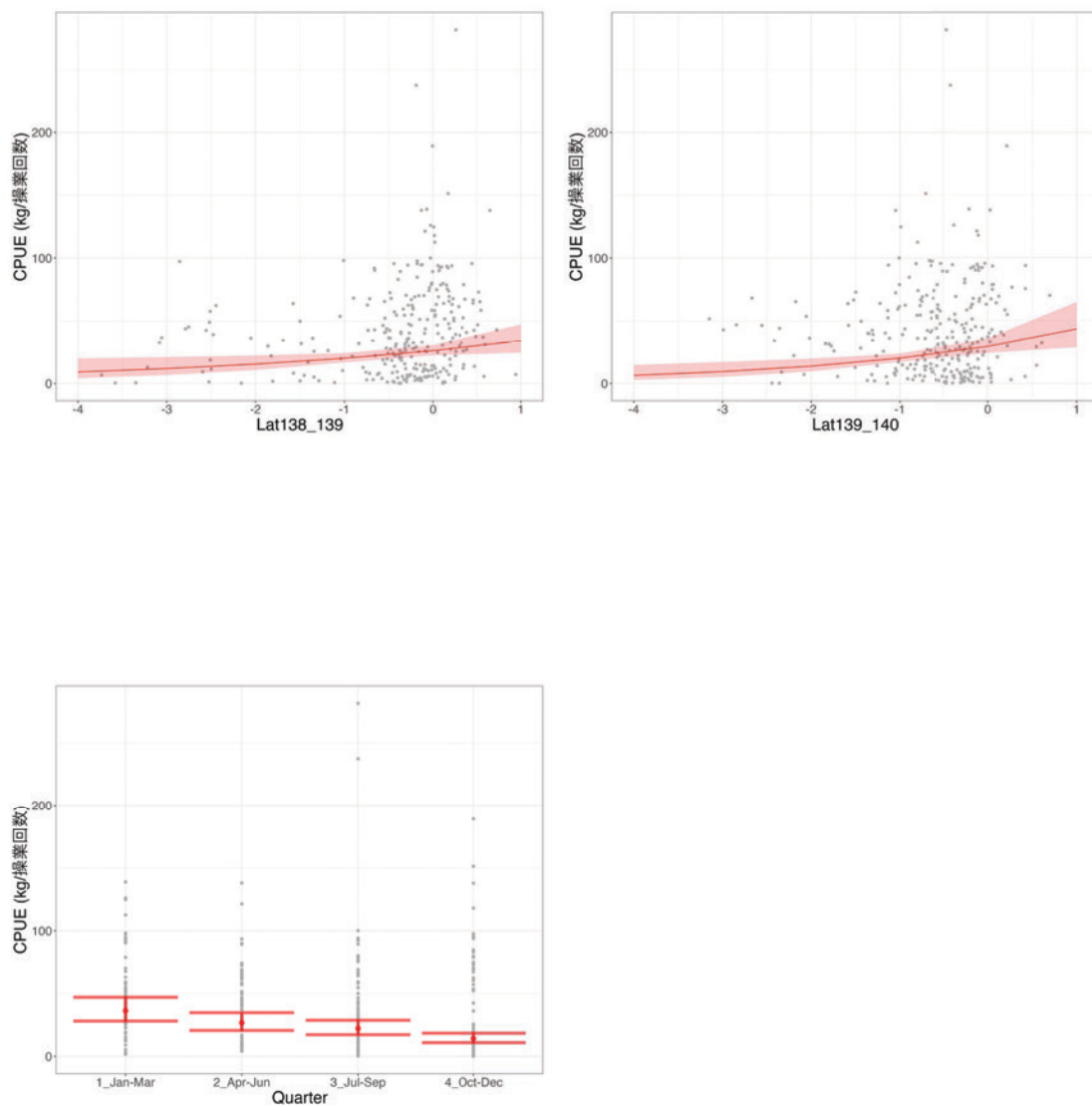


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

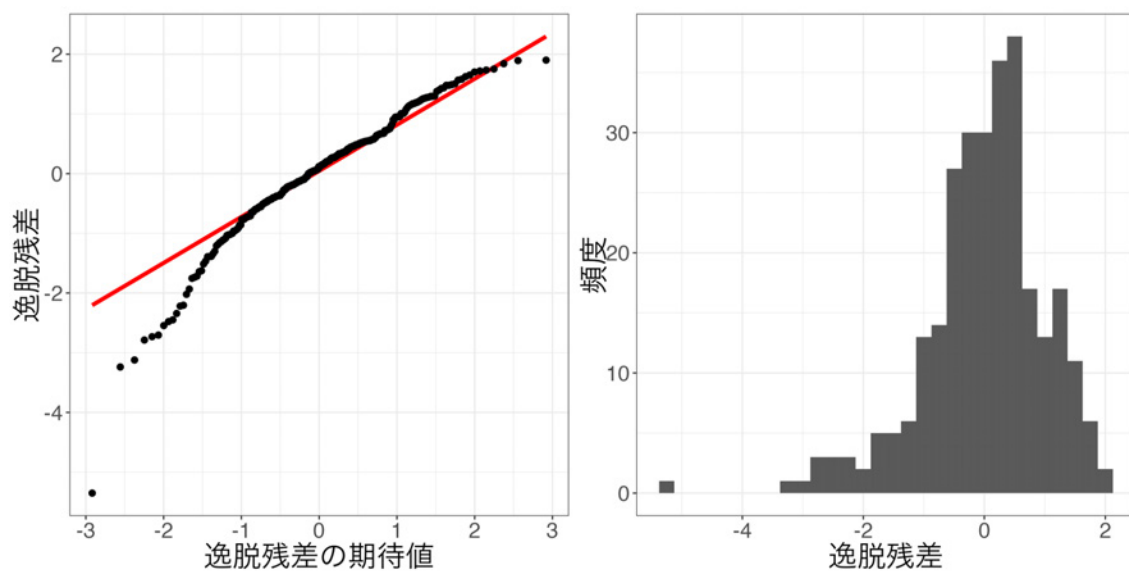


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

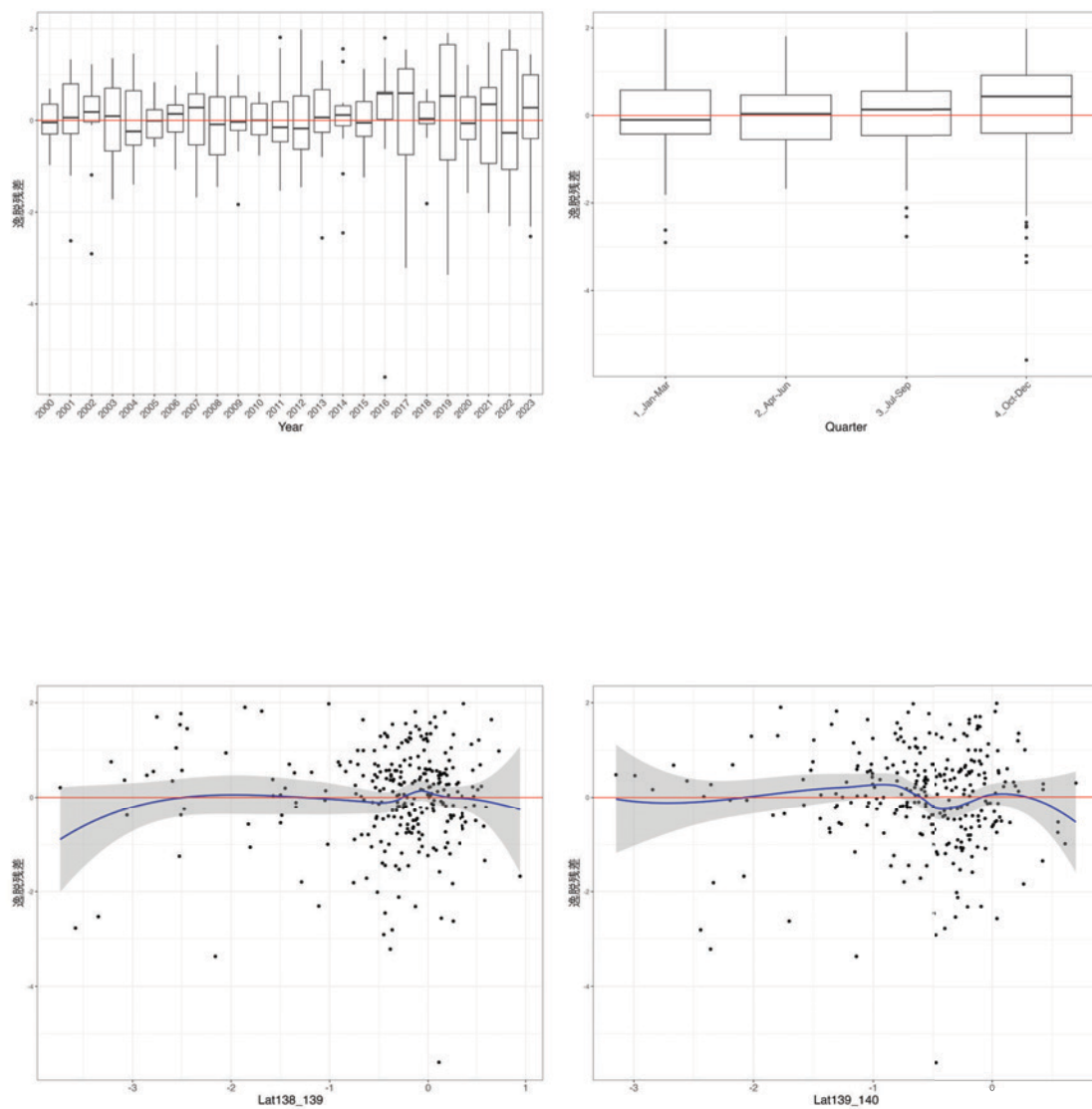


図 6. ベストモデルの層別逸脱残差 Lat138_139、Lat139_140 に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

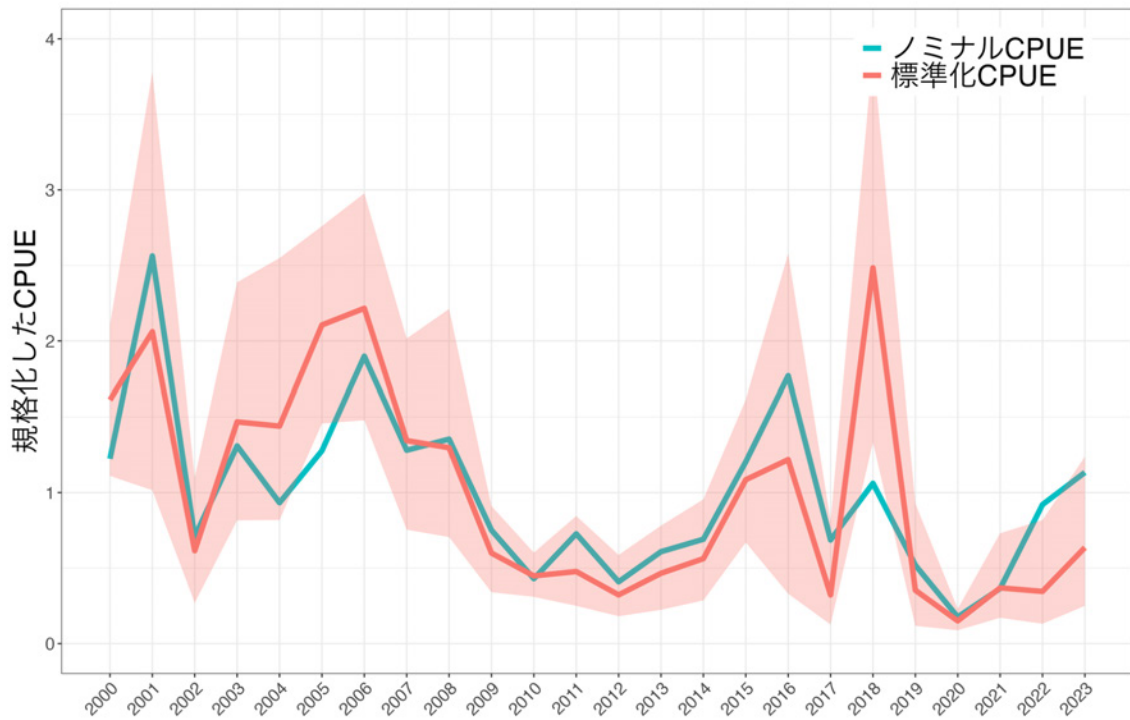


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Lat138_139 + Lat139_140 + Quarter + Year + 1, family = gaussian,
data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	4.667	0.355	13.153	0.0000	***
Lat138_139	0.263	0.109	2.425	0.0160	*
Lat139_140	0.381	0.122	3.127	0.0020	**
Quarter2_Apr-Jun	-0.306	0.187	-1.639	0.1025	
Quarter3_Jul-Sep	-0.491	0.184	-2.667	0.0081	**
Quarter4_Oct-Dec	-0.940	0.186	-5.050	0.0000	***
Year2001	0.245	0.462	0.531	0.5960	
Year2002	-0.964	0.462	-2.087	0.0379	*
Year2003	-0.094	0.451	-0.209	0.8349	
Year2004	-0.113	0.469	-0.242	0.8091	
Year2005	0.267	0.455	0.586	0.5581	
Year2006	0.318	0.451	0.705	0.4813	
Year2007	-0.182	0.450	-0.405	0.6860	
Year2008	-0.218	0.453	-0.481	0.6310	
Year2009	-0.990	0.456	-2.171	0.0308	*
Year2010	-1.280	0.461	-2.777	0.0059	**
Year2011	-1.217	0.450	-2.705	0.0073	**
Year2012	-1.609	0.450	-3.574	0.0004	***
Year2013	-1.242	0.454	-2.736	0.0067	**
Year2014	-1.053	0.451	-2.333	0.0204	*
Year2015	-0.396	0.453	-0.875	0.3824	
Year2016	-0.280	0.451	-0.622	0.5343	
Year2017	-1.609	0.449	-3.581	0.0004	***
Year2018	0.432	0.482	0.896	0.3709	

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
Year2019	-1.518	0.496	-3.063	0.0024	**
Year2020	-2.372	0.457	-5.194	0.0000	***
Year2021	-1.474	0.470	-3.137	0.0019	**
Year2022	-1.540	0.459	-3.356	0.0009	***
Year2023	-0.930	0.467	-1.990	0.0477	*

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 1.209321)

Null deviance: 514.9 on 283 degrees of freedom

Residual deviance: 308.4 on 255 degrees of freedom

AIC: 889.34

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名		変数略記
年		Year
季節		Quarter
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(神奈川県・東京湾口部)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	東京湾口部においてキンメダイの漁獲がある神奈川県籍船の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2000～2023年(2023年は1～5月のみ)
標準化に使用した期間	2000～2023年(2023年は1～5月のみ)
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS IIから取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、100m層流速
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	標準化CPUEは2002年に大きく減少し、2008年から2012年にかけてさらに減少した。2012年以降、多少の増減はあるものの低水準にある。2020年以降も依然として低水準な状態が続いているが、2022年、2023年と2年連続で増加した。標準化CPUEとノミナルCPUEの値に大きな違いはみられなかったが、2000～2001年、2003～2008年および2018年は標準化CPUEのほうが顕著に高かった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。その結果、東京湾口部における神奈川県籍船のデータによる標準化 CPUE は、環境要因による影響がより考慮されたこと、モデル診断結果も概ね良好であったことから、VPA のチューニング指数の一つとして導入することとなった。

今年度も昨年度までに引き続き、最新年のデータを追加した上で東京湾口部における神奈川県籍船による CPUE の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある神奈川県の東京湾口部の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2000～2023 年であり、全レコードを解析に使用した。ただし、東京湾口部における神奈川県籍船による努力量は近年減少傾向にあり、2023 年 6～12 月は東京湾口部において操業が行われなかった。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM (log-normal GLM) である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁 (流軸から 13 海里) の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した (Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141)。東京湾口部では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 140 度における黒潮北縁緯度 (Lat_140) を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差 (すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141) を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日: 2024 年 4 月 4 日) における深度帯別 (0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層) の水温 (Temperature)、流向 (Direction)、流速 (Speed) の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、東京湾口部における神奈川県籍船は野島崎西側での操業が多いことから、図 1 の 31、33 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。一方、31、33 番のグリッドでは水深が浅いことから、水温、流向、流速は 0 m 層、100 m 層、200 m 層、底層の再解析値のみを用いた。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数 (Direcfcct) に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係プロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと (図 2)、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果 (Year)、季節効果 (Quarter: 12 ヶ月を 1~3 月、4~6 月、7~9 月、10~12 月に 4 等分) については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \\ \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{200} + \text{Temperature}_{\text{Bottom}} +$$

Speed_0 + Speed_100 + Speed_200 + Speed_Bottom +
Direcftct_0 + Direcftct_100 + Direcftct_200 + Direcftct_Bottom +
Lat_140 +
Lat138_139 + Lat139_140 + Lat140_141

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準（AIC）によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル（例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの）は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された（表 1）。

$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Speed}_{100}$

東京湾口地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 18 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小 AIC+2 の範囲の他のモデルをみると、ベストモデルの説明変数に加え、黒潮入込や水温効果が含まれることが多く、黒潮の影響や漁場内の流れ、水温に関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数への CPUE の応答（図 4）からも、漁場内の流速による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった（図 5）。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった（図 6）。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は 2002 年に大きく減少し、2008 年から 2012 年にかけてさらに減少した。2013 年以降、多少の増減はあるものの低水準な状態にある。2020 年以降も依然として低水準な状態が続いているが、2022 年、2023 年と 2 年連続で増加した。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と類似した一方、2000～2001 年、2003～2008 年および 2018 年は標準化 CPUE のほうが顕著に高かった。

一方、上述のとおり、2023 年は神奈川県籍船による操業が 6 月以降行われなかったが、半年以上のデータが欠損することで推定結果の不確実性が增大していることが懸念される。2023 年の推定値に対する 95%信頼区間をみると、CPUE がより高い水準にあった 2009 年以前と同程度以上まで大きくなっており（図 7、表 2）、実際にこのような不確実性が解析結果に反映されていた可能性がある。近年当該操業の努力量は減少を続けていることから、データの質の変化や解析結果の妥当性について、継続的に注視していく必要がある。

3.2 昨年度結果との比較

今年度のベストモデルで選択された説明変数は、昨年度のものと同様であり、ベストモデルから得られた標準化 CPUE とのトレンドに昨年度との大きな違いはなかった。

引用文献

Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through

development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.

- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf
- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和 3 (2021) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和 3 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもの
のうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向				黒潮北緯緯度			経度間の黒潮北緯の緯度差			流速				水温				季節	年	df	logLik	AIC	delta			
	0	100	200	底	東経140度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	底	0	100	200	底											
7.45	+					0.18			-1.78										+	+	35	-301.7	673.3	0.0			
7.00	+					0.16			-2.06								-0.24		+	+	38	-298.9	673.7	0.4			
4.59										-3.12									+	+	29	-308.0	673.9	0.6			
6.69	+					0.15			-1.76								-0.15		+	+	38	-299.0	674.1	0.8			
6.00										-3.04								-0.17		+	+	30	-307.1	674.3	1.0		
7.19	+								-2.12									-0.26		+	+	37	-300.2	674.3	1.0		
6.93	+								-1.78									-0.17		+	+	37	-300.2	674.5	1.2		
7.76	+								-1.84										-0.23		+	+	34	-303.4	674.7	1.4	
6.51	+					0.17			-1.33								-0.1			+	+	35	-302.4	674.8	1.5		
7.00	+					0.17				-2.32								-0.17			+	+	35	-302.4	674.8	1.5	
4.93	+					0.18			-1.96											+	+	37	-300.5	675.0	1.7		
4.59						0.09				-2.92										+	+	30	-307.5	675.0	1.7		
9.00	+				-0.05	0.16			-1.69									-0.20			+	+	36	-301.6	675.1	1.8	
5.49										-2.85									-0.08		+	+	30	-307.6	675.1	1.8	
6.66	+					0.14				-2.68									-0.20		+	+	38	-299.6	675.2	1.9	
6.83	+									-2.86									-0.22		+	+	37	-300.6	675.3	1.9	
7.45	+					0.18		0.01	-1.78										-0.21			+	+	36	-301.7	675.3	2.0
7.45	+					0.18	0		-1.78										-0.21			+	+	36	-301.7	675.3	2.0

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2000	1.80	1.98	1.43	2.57	0.15
2001	4.06	4.44	3.13	5.91	0.16
2002	1.18	0.99	0.59	1.55	0.25
2003	1.50	1.59	0.91	2.45	0.25
2004	0.84	1.14	0.83	1.49	0.16
2005	1.76	2.00	1.29	2.94	0.21
2006	1.18	1.32	0.98	1.64	0.13
2007	1.42	1.65	1.18	2.29	0.17
2008	1.28	1.43	0.87	2.15	0.22
2009	1.44	1.10	0.69	1.77	0.24
2010	0.27	0.33	0.21	0.48	0.21
2011	1.05	0.71	0.42	1.34	0.33
2012	0.26	0.18	0.09	0.39	0.41
2013	0.23	0.19	0.10	0.36	0.35
2014	0.36	0.27	0.13	0.49	0.34
2015	0.33	0.37	0.24	0.51	0.19
2016	0.88	0.76	0.43	1.21	0.26
2017	0.51	0.40	0.16	0.70	0.36
2018	0.75	1.05	0.80	1.30	0.12
2019	0.38	0.36	0.22	0.57	0.26
2020	0.39	0.31	0.15	0.55	0.35
2021	0.29	0.28	0.16	0.44	0.25
2022	0.72	0.49	0.17	1.07	0.45
2023	1.12	0.68	0.22	1.83	0.53

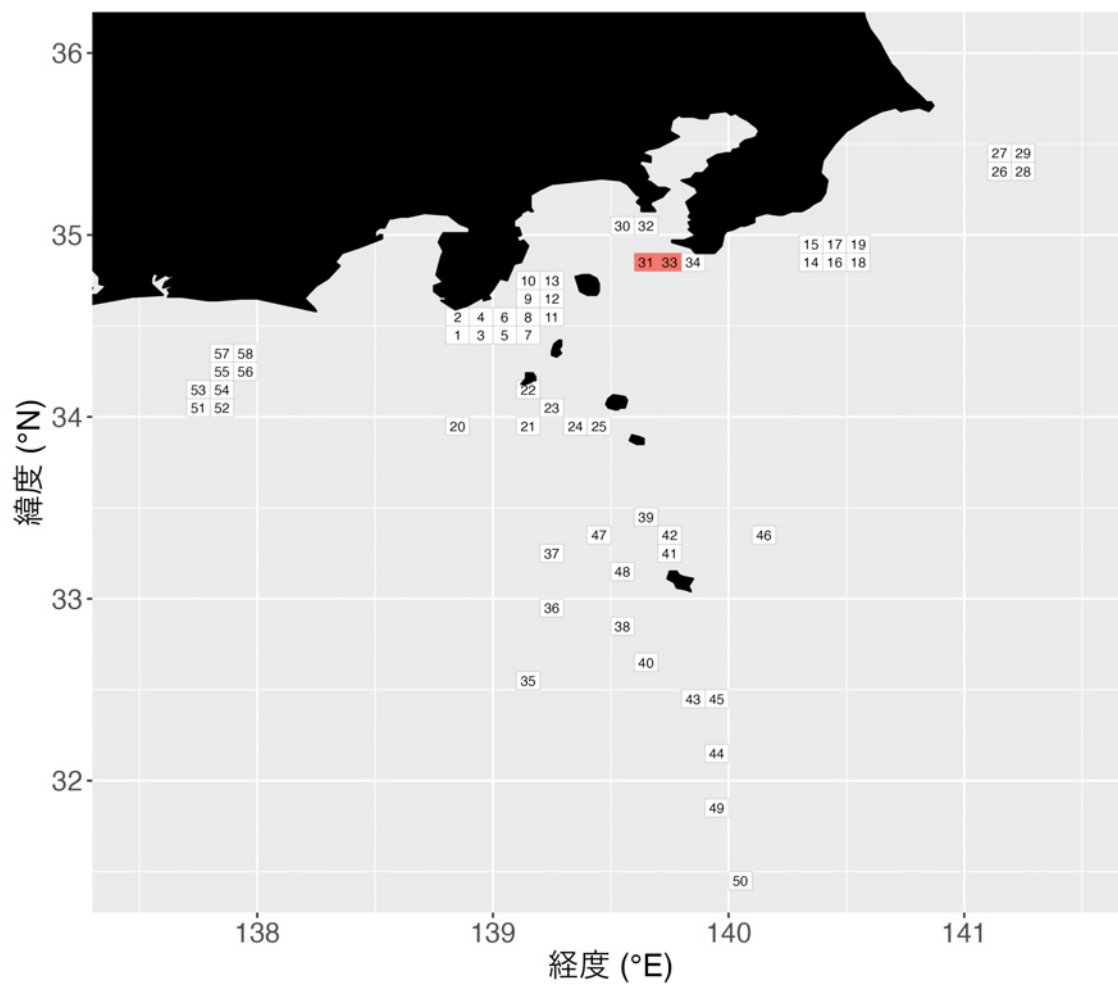


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。東京湾口部は31、33番のグリッドを使用。

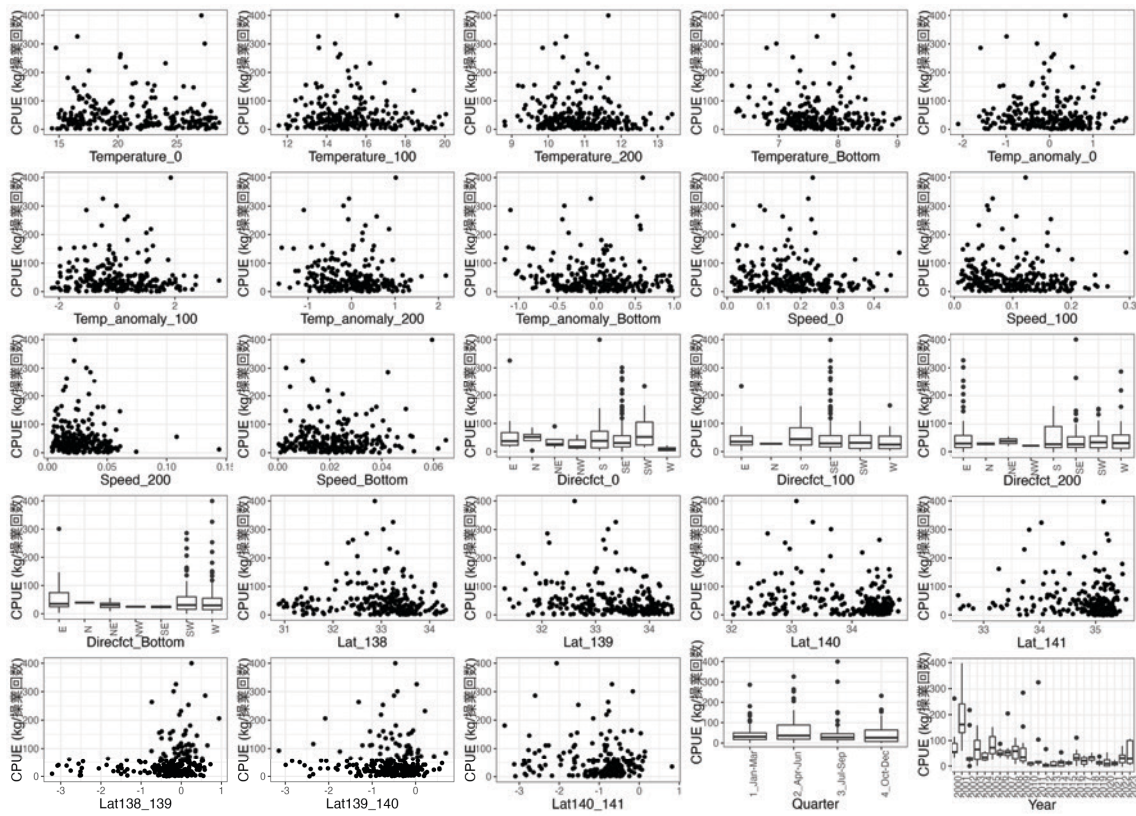


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

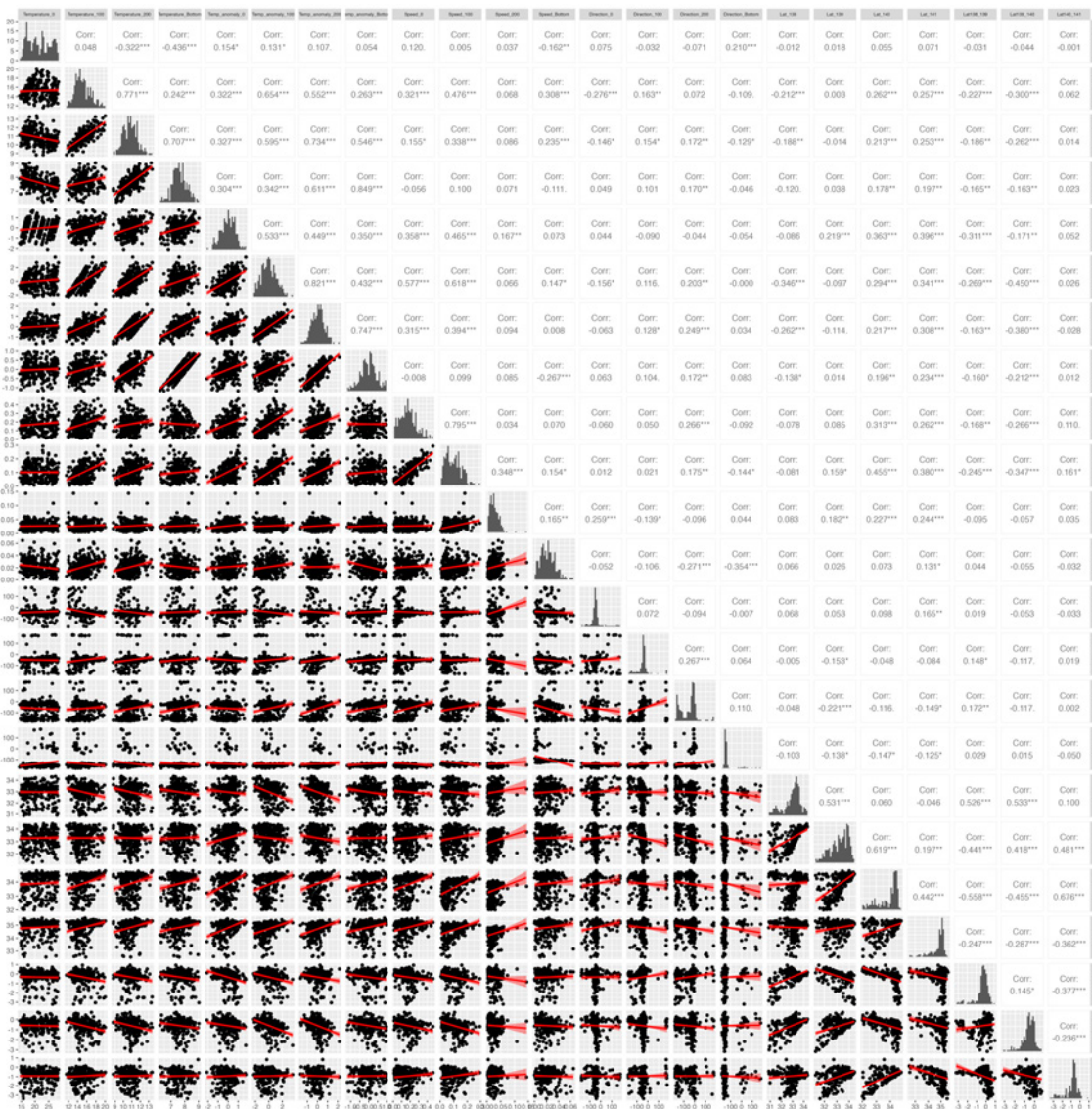


図 3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

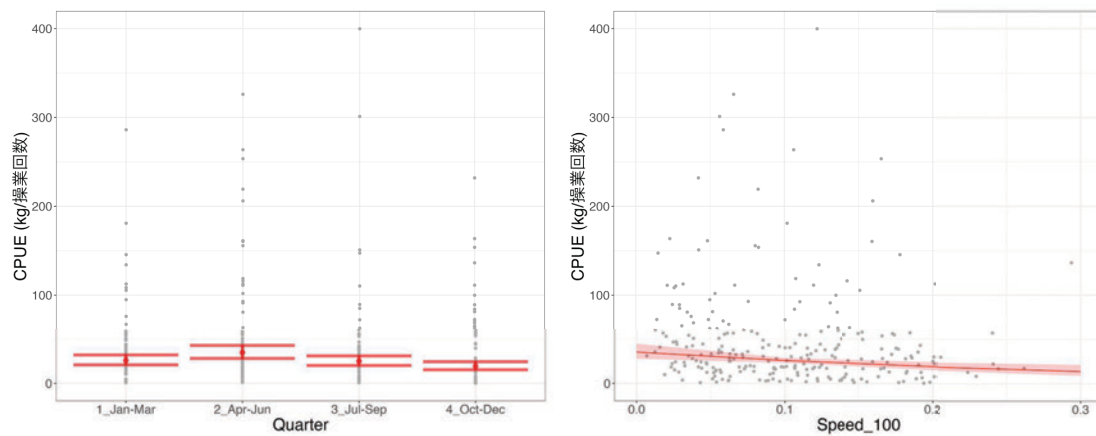


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

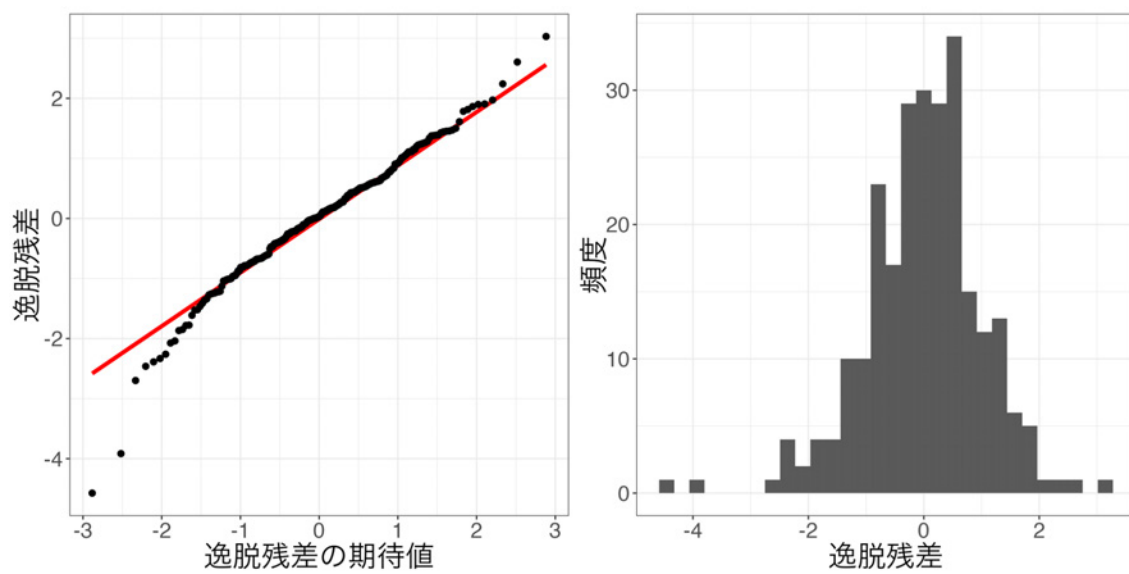


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

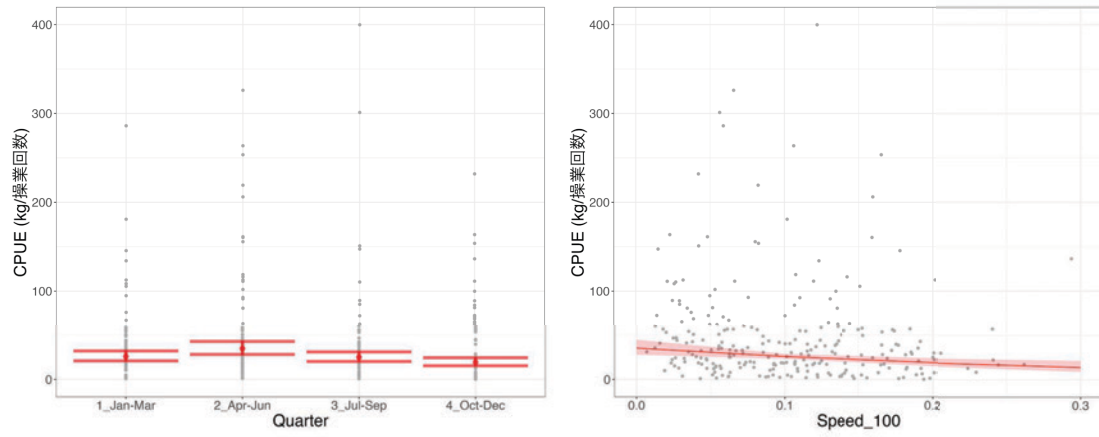


図6. ベストモデルの層別逸脱残差 Speed_100に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィットさせた平滑化曲線 (loess) と、その95%信頼区間を示す。

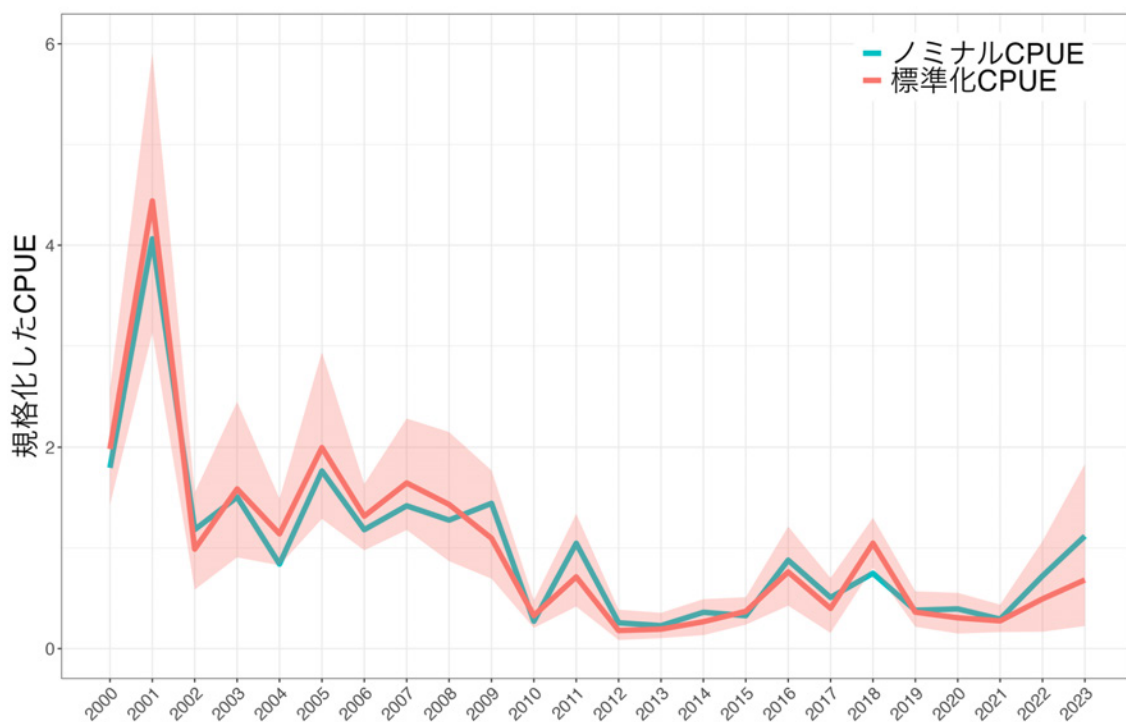


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Quarter + Speed_100 + Year + 1, family = gaussian, data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	4.595	0.285	16.113	0.0000	***
Quarter2_Apr-Jun	0.293	0.152	1.923	0.0558	.
Quarter3_Jul-Sep	-0.035	0.153	-0.229	0.8194	
Quarter4_Oct-Dec	-0.289	0.159	-1.812	0.0713	.
Speed_100	-3.116	1.067	-2.921	0.0038	**
Year2001	0.806	0.360	2.238	0.0262	*
Year2002	-0.696	0.362	-1.924	0.0557	.
Year2003	-0.223	0.354	-0.630	0.5292	
Year2004	-0.553	0.354	-1.561	0.1200	
Year2005	0.007	0.352	0.019	0.9845	
Year2006	-0.410	0.354	-1.157	0.2483	
Year2007	-0.186	0.370	-0.504	0.6150	
Year2008	-0.325	0.353	-0.923	0.3571	
Year2009	-0.592	0.353	-1.678	0.0947	.
Year2010	-1.798	0.361	-4.977	0.0000	***
Year2011	-1.023	0.355	-2.885	0.0043	**
Year2012	-2.401	0.364	-6.603	0.0000	***
Year2013	-2.327	0.381	-6.111	0.0000	***
Year2014	-2.004	0.352	-5.691	0.0000	***
Year2015	-1.679	0.360	-4.662	0.0000	***
Year2016	-0.957	0.362	-2.647	0.0087	**
Year2017	-1.601	0.360	-4.447	0.0000	***
Year2018	-0.638	0.363	-1.758	0.0801	.
Year2019	-1.700	0.394	-4.312	0.0000	***
Year2020	-1.868	0.369	-5.056	0.0000	***

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
Year2021	-1.973	0.394	-5.007	0.0000	***
Year2022	-1.390	0.396	-3.512	0.0005	***
Year2023	-1.066	0.465	-2.291	0.0229	*

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.7436515)

Null deviance: 364 on 253 degrees of freedom

Residual deviance: 168.1 on 226 degrees of freedom

AIC: 673.92

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名	変数略記	
年	Year	
季節	Quarter	
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(東京都・神津島地区)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある東京都神津島地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2005～2023年
標準化に使用した期間	2005～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS II から取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、100m層水温、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経140度-141度)
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	標準化CPUEは2008年以降、2013年にかけて減少した。その後は2020年まで増加傾向にあり、2021年以降わずかに減少に転じたものの、2023年も2020年と概ね同水準にある。ノミナルCPUEの長期的なトレンドは標準化CPUEと類似した一方、2018年以降は標準化CPUEのほうが高い値となった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。東京都の神津島地区のデータを用いて推定を行った結果、黒潮や漁場内の水温の影響による CPUE の低下が補正され、モデル診断結果も概ね良好であったことから、このモデルから得られた年トレンドを、キンメダイ太平洋系群の VPA のチューニング指数の 1 つとして利用することとなった。

今年度も昨年度までに引き続き、最新年のデータを追加した上で東京都神津島地区の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある東京都の神津島地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2005～2023 年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM（log-normal GLM）である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に

影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁（流軸から 13 海里）の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した（Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141）。神津島地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 139 度における黒潮北縁緯度（Lat_139）を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差（すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141）を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日：2024 年 4 月 4 日) における深度帯別（0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層）の水温（Temperature）、流向（Direction）、流速（Speed）の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、神津島地区では図 1 の 23 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数（Direcftct）に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係性をプロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと（図 2）、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果（Year）、季節効果（Quarter: 12 ヶ月を 1～3 月、4～6 月、7～9 月、10～12 月に 4 等分）については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \log(\text{CPUE}) \sim & \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{200} + \text{Temperature}_{400} + \text{Temperature}_{\text{Bottom}} \\ & + \\ & \text{Speed}_0 + \text{Speed}_{100} + \text{Speed}_{200} + \text{Speed}_{400} + \text{Speed}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Direcftct}_0 + \text{Direcftct}_{100} + \text{Direcftct}_{200} + \text{Direcftct}_{400} + \text{Direcftct}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Lat}_{139} + \\ & \text{Lat138}_{139} + \text{Lat139}_{140} + \text{Lat140}_{141} \end{aligned}$$

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準 (AIC) によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル (例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの) は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された (表 1)。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Temperature}_{100} + \text{Lat}_{140_141}$$

神津島地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小AIC+2の範囲に10モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小AIC+2の範囲の他のモデルをみると、ベストモデルの説明変数に加え、流速が選ばれているモデルが多く、黒潮の影響や漁場内の流れ・水温に関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数へのCPUEの応答(図4)からも、黒潮入込の強弱や水温によるCPUEの変化が検出された。

ベストモデルにおけるQQプロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった(図5)。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった(図6)。

ベストモデルにより推定した標準化CPUEおよび各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナルCPUEの変化を図7および表2に示す。標準化CPUEは2007年に増加したものの、2008年以降、2013年にかけて減少した。その後は2020年まで増加傾向にあり、2021年以降わずかに減少したものの、2023年も2020年と概ね同水準にある。ノミナルCPUEの長期的なトレンドは標準化CPUEと類似した一方、2018年以降は標準化CPUEのほうが高い値となった。それ以外はノミナルCPUEのほうが高い、もしくは指標間での値の違いは小さかった。

3.2 昨年度結果との比較

今年度のベストモデルで選択された説明変数は、昨年度のものと同様であり、ベストモデルから得られた標準化CPUEとのトレンドに昨年度との大きな違いはなかった。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和4(2022)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和4年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf
- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和3(2021)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和3年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもの
のうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向					黒潮北緯緯度			経度間の黒潮北緯の緯度差			流速					水温					季節	年	df	logLik	AIC	delta	
	0	100	200	400	底	東経139度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	400	底	0	100	200	400	底									
4.62									-0.06														+	+	25	76.2	-102.3	0.0
4.64				+					-0.06														+	+	32	82.7	-101.4	0.9
4.66									-0.06				0.13										+	+	26	76.4	-100.9	1.4
4.61								0.01	-0.06														+	+	26	76.4	-100.8	1.5
5.05							-0.01		-0.06														+	+	26	76.3	-100.6	1.7
4.64									-0.06					0.12									+	+	26	76.3	-100.5	1.8
4.60									-0.06	-0.03													+	+	26	76.2	-100.4	1.9
4.64									-0.06				0.03										+	+	26	76.2	-100.4	1.9
4.62									-0.06		0												+	+	26	76.2	-100.3	2.0
4.62								0	-0.06														+	+	26	76.2	-100.3	2.0

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2005	0.99	0.98	0.87	1.09	0.06
2006	0.96	0.93	0.84	1.05	0.06
2007	1.34	1.29	1.16	1.43	0.05
2008	1.15	1.12	1.03	1.21	0.04
2009	1.29	1.18	1.08	1.29	0.04
2010	1.05	1.06	0.98	1.14	0.04
2011	0.93	0.90	0.72	1.05	0.10
2012	0.81	0.80	0.73	0.88	0.05
2013	0.83	0.79	0.70	0.89	0.06
2014	0.83	0.79	0.71	0.87	0.06
2015	0.93	0.91	0.82	1.00	0.05
2016	0.89	0.86	0.79	0.93	0.04
2017	1.03	1.04	0.96	1.12	0.04
2018	1.00	1.05	0.95	1.16	0.05
2019	1.01	1.09	1.01	1.20	0.04
2020	1.05	1.11	1.01	1.22	0.05
2021	0.99	1.05	0.93	1.20	0.07
2022	0.96	1.02	0.94	1.10	0.04
2023	0.96	1.02	0.92	1.14	0.06

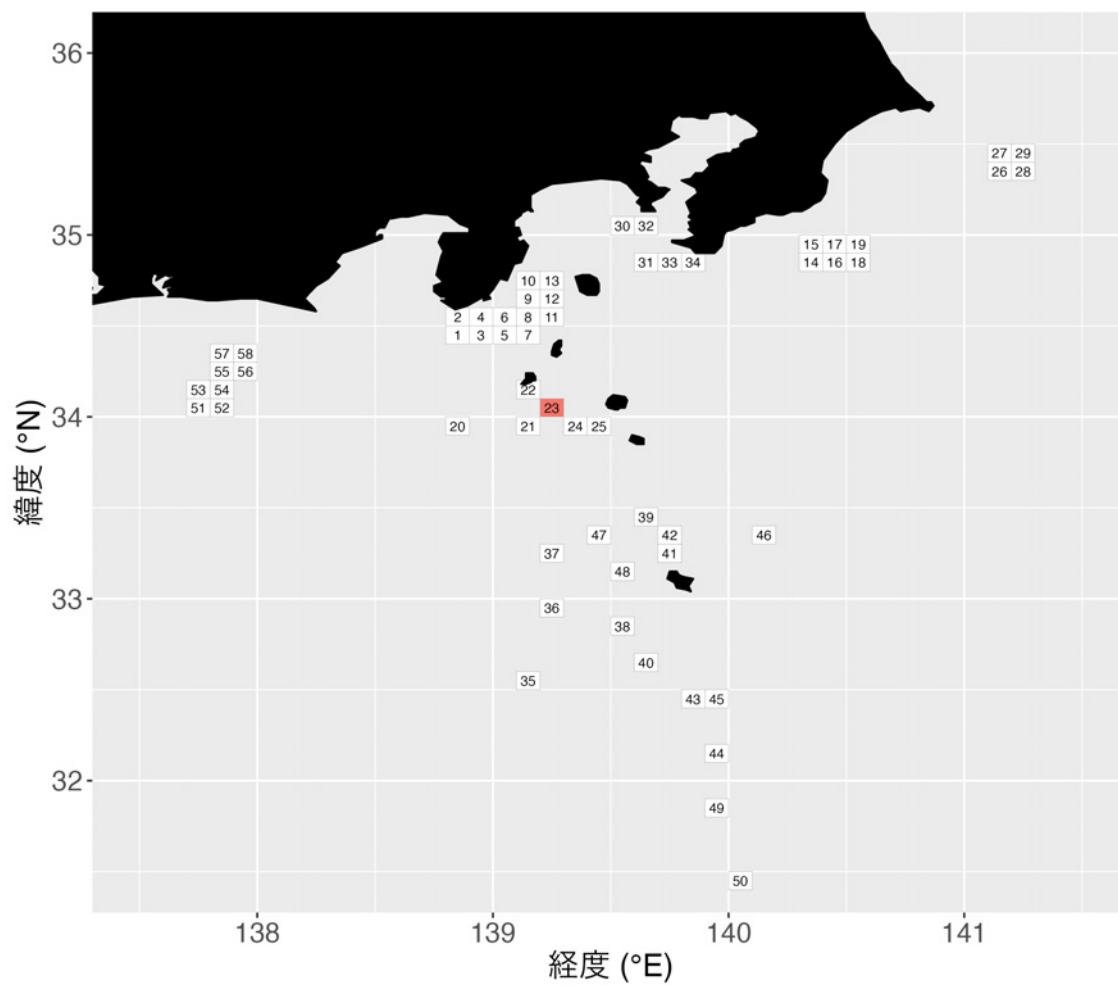


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。神津島地区は23番のグリッドを使用。

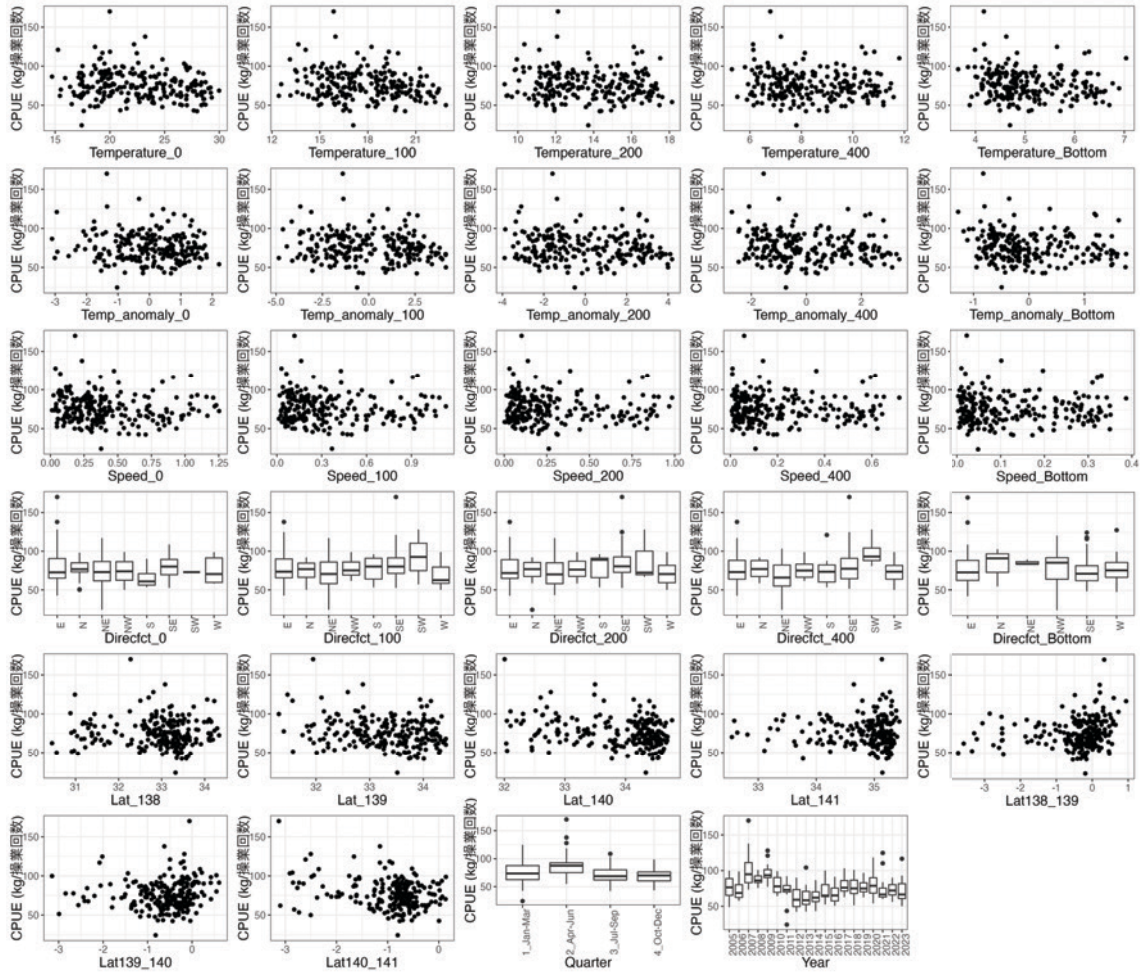


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

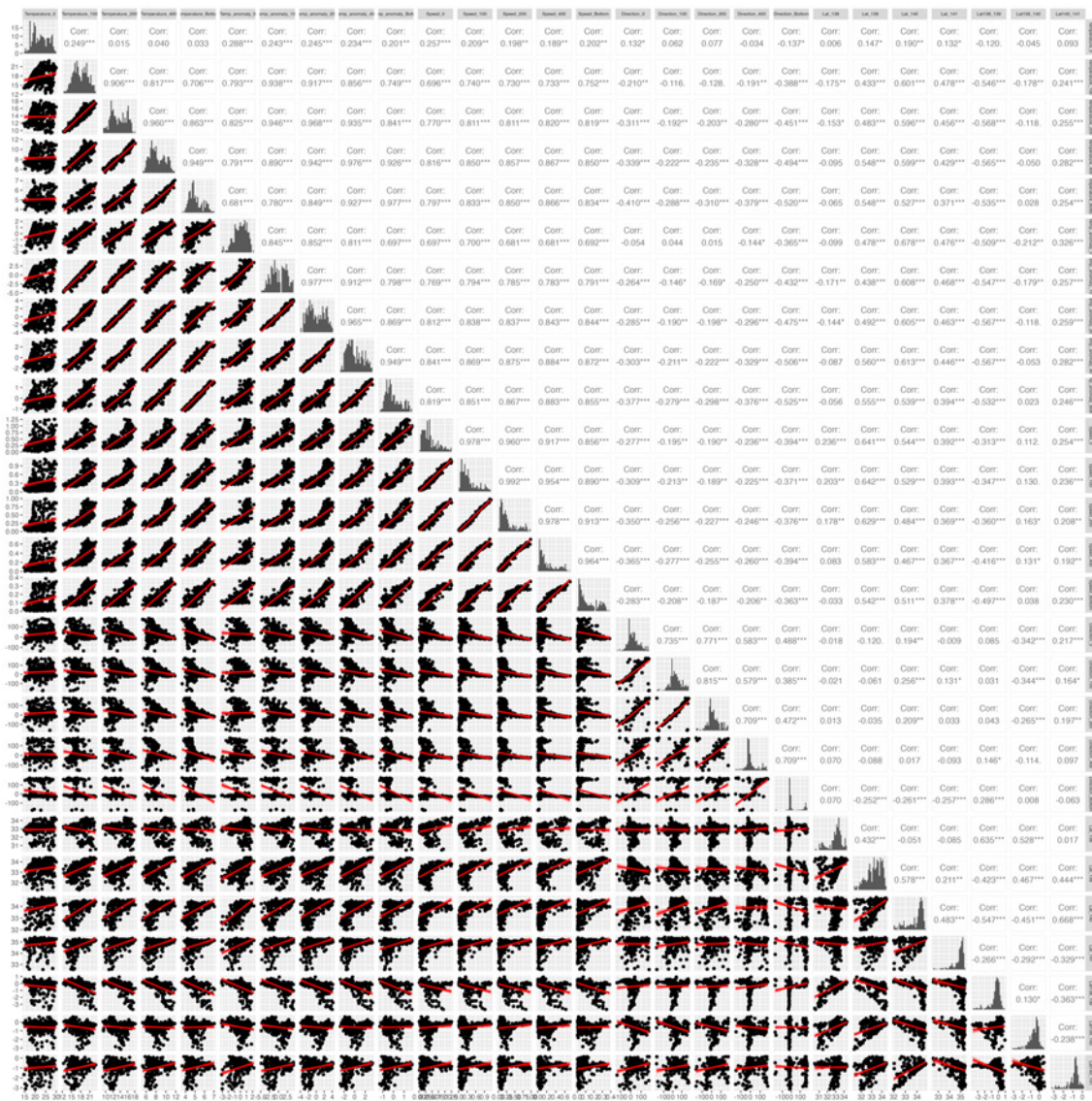


図 3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

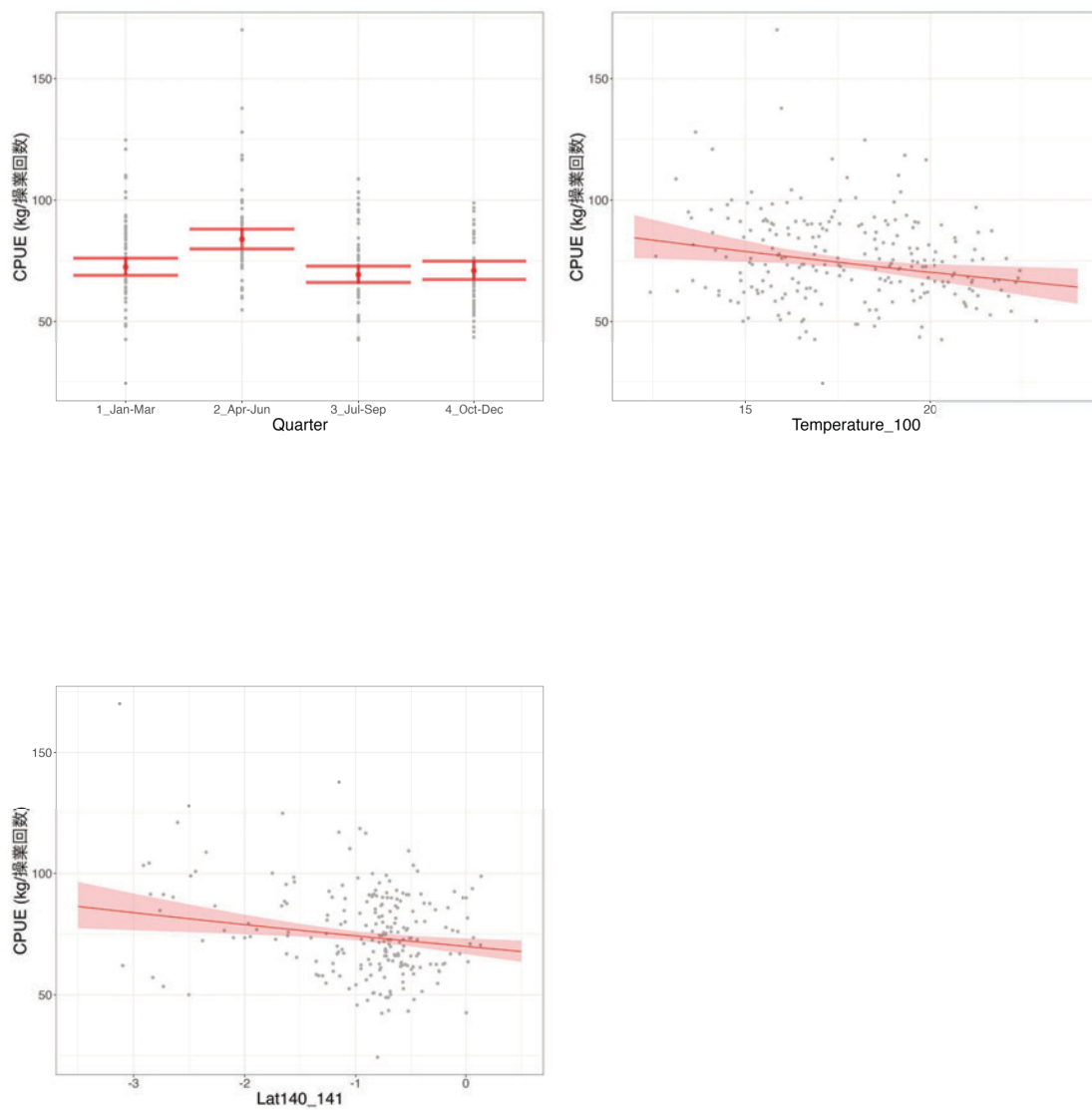


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

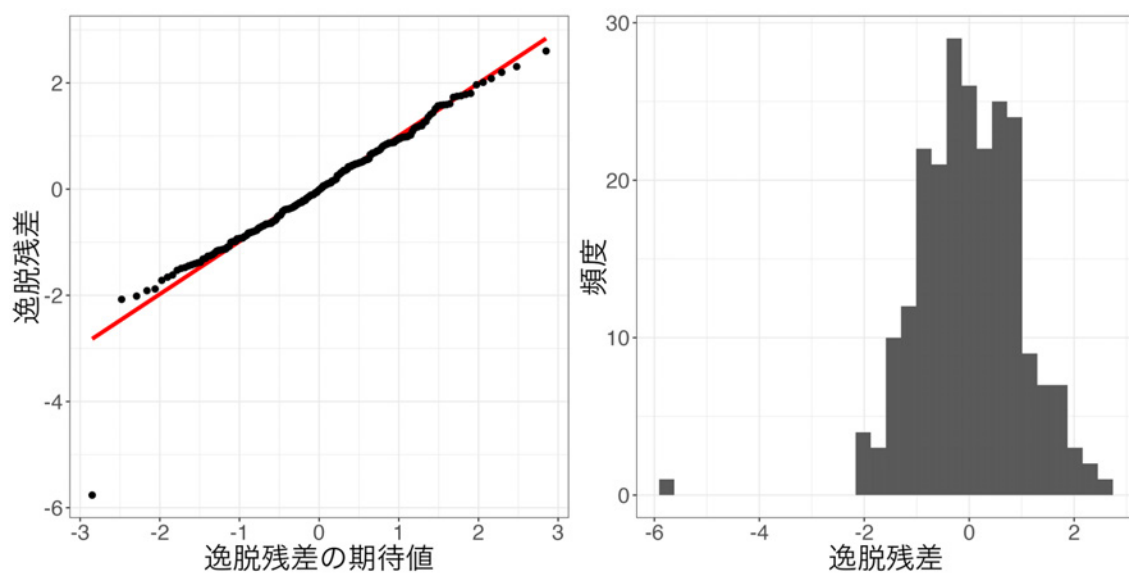


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

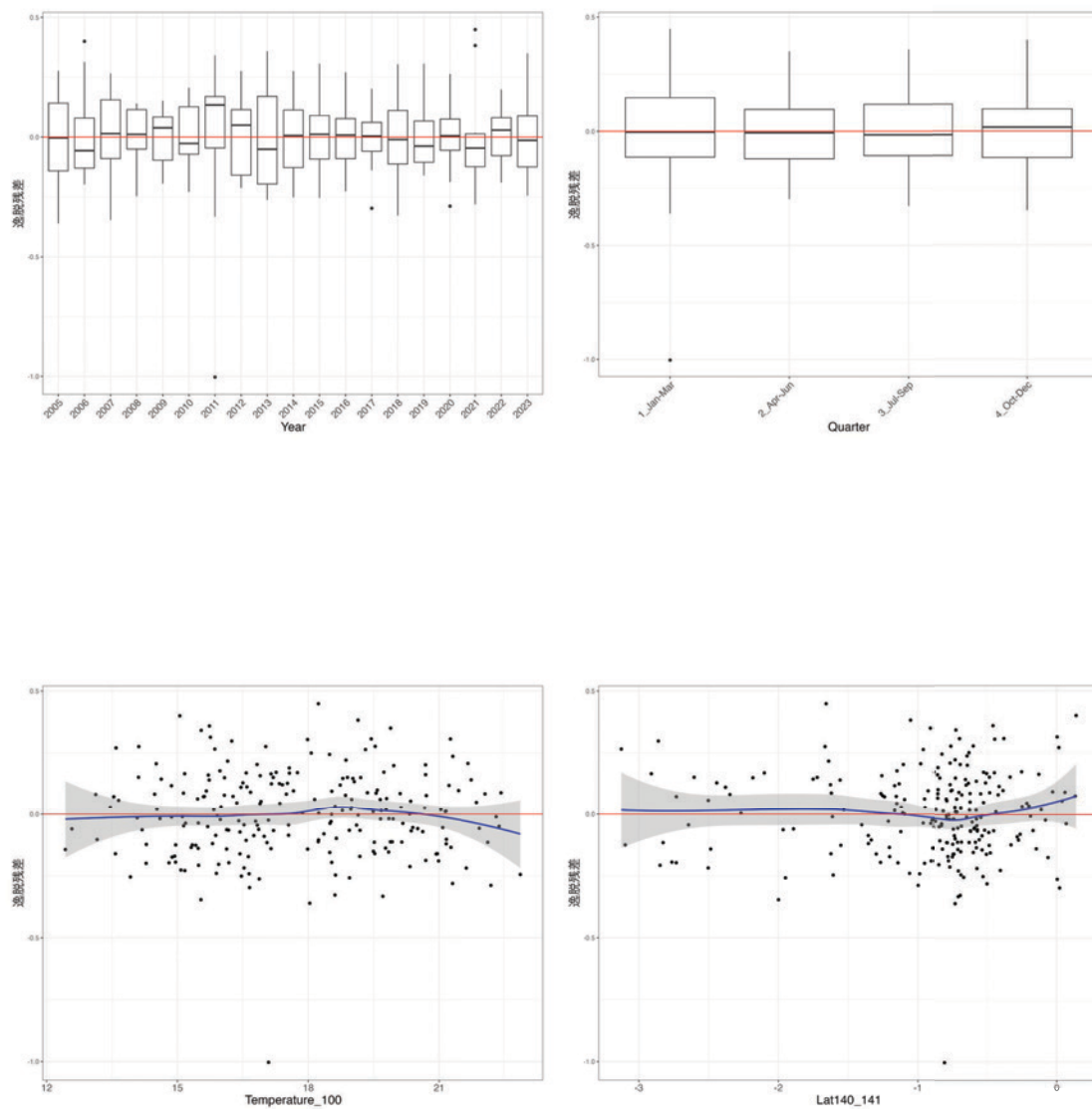


図 6. ベストモデルの層別逸脱残差 Temperature_100、Lat140_141 に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

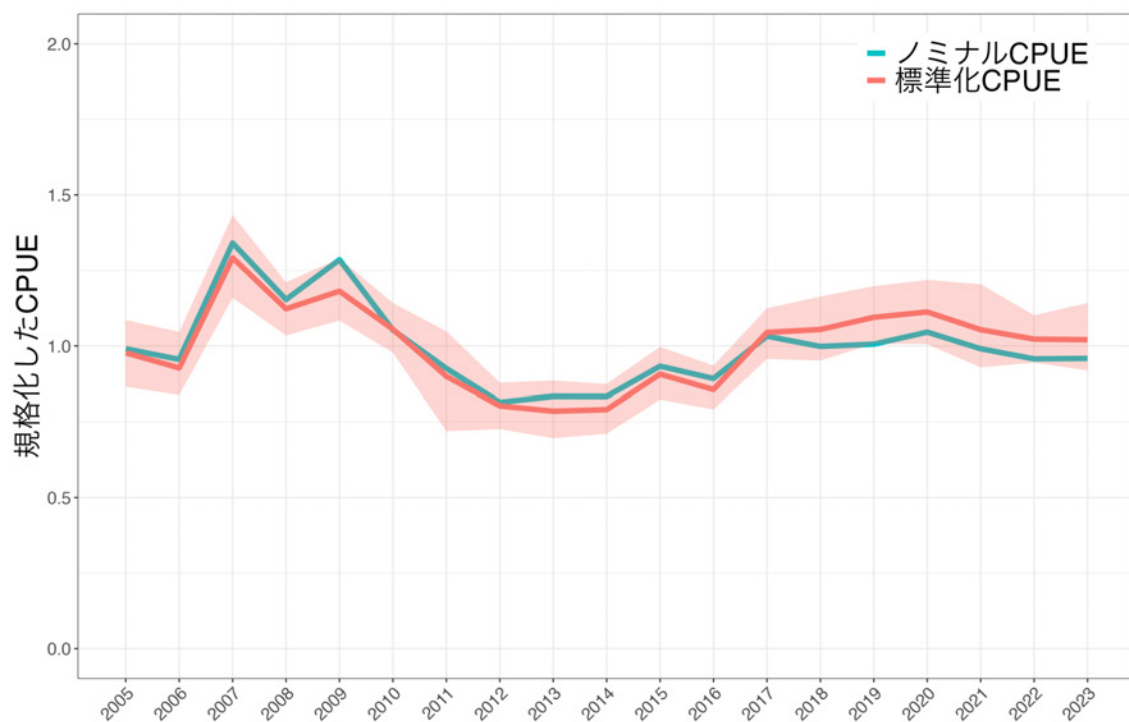


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Lat140_141 + Quarter + Temperature_100 + Year + 1, family = gaussian, data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	4.622	0.163	28.327	0.0000	***
Lat140_141	-0.060	0.021	-2.842	0.0049	**
Quarter2_Apr-Jun	0.146	0.035	4.228	0.0000	***
Quarter3_Jul-Sep	-0.044	0.034	-1.273	0.2045	
Quarter4_Oct-Dec	-0.021	0.038	-0.548	0.5846	
Temperature_100	-0.023	0.009	-2.572	0.0108	*
Year2006	-0.053	0.078	-0.673	0.5018	
Year2007	0.279	0.075	3.721	0.0003	***
Year2008	0.139	0.076	1.838	0.0675	.
Year2009	0.189	0.077	2.455	0.0149	*
Year2010	0.077	0.075	1.023	0.3073	
Year2011	-0.083	0.075	-1.105	0.2705	
Year2012	-0.196	0.075	-2.610	0.0097	**
Year2013	-0.218	0.076	-2.863	0.0046	**
Year2014	-0.212	0.075	-2.806	0.0055	**
Year2015	-0.075	0.075	-1.001	0.3180	
Year2016	-0.133	0.075	-1.765	0.0790	.
Year2017	0.067	0.075	0.891	0.3742	
Year2018	0.076	0.077	0.983	0.3269	
Year2019	0.114	0.080	1.413	0.1593	
Year2020	0.130	0.081	1.602	0.1108	
Year2021	0.075	0.081	0.932	0.3523	
Year2022	0.045	0.079	0.572	0.5678	
Year2023	0.043	0.081	0.534	0.5941	

Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)
----------	----------------	---------	----------

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.03355132)

Null deviance: 13.11 on 227 degrees of freedom

Residual deviance: 6.844 on 204 degrees of freedom

AIC: -102.31

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名		変数略記
年		Year
季節		Quarter
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(東京都・三宅島地区)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある東京都三宅島地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2007～2023年
標準化に使用した期間	2007～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS IIから取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、底層水温、0m層流速
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	標準化CPUEは、2007年以降、2012年まで横ばい傾向であったが2013～2014年に増加、2014年以降は変動しつつも横ばい傾向にある。ただし、2021年以降は、3年連続して減少した。標準化CPUEとノミナルCPUEの値に大きな違いはみられなかったが、2007年、2009～2010年はノミナルCPUEのほうが、2017年以降は標準化CPUEのほうが顕著に高かった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。その結果、一都三県の 7 地区のうち、6 地区における標準化 CPUE は、環境要因の影響がより考慮されたと判断されたこと、モデル診断結果も良好であったことから、VPA のチューニング指数として導入するに至った（八丈島地区は引き続き標準化 CPUE を検討中）。令和 5 年度には、本系群の資源評価で今後検討すべき課題の 1 つとして整理されている「標準化 CPUE 未実施海域への拡大」に対応するため、新たに東京都の三宅島地区におけるデータを用いた標準化 CPUE を検討した（亘ほか 2024）。その結果、環境要因による CPUE の変化が補正され、モデル診断結果も良好であったことから、このモデルから得られた年トレンドを、キンメダイ太平洋系群の VPA のチューニング指数の 1 つとし利用することとなった。

今年度も昨年度に引き続き、最新年のデータを追加した上で東京都三宅島地区の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある東京都の三宅島地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準

化の期間は、2007～2023年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM (log-normal GLM) である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁 (流軸から 13 海里) の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した (Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141)。三宅島地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 139 度における黒潮北縁緯度 (Lat_139) を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差 (すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141) を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日: 2024 年 4 月 4 日) における深度帯別 (0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層) の水温 (Temperature)、流向 (Direction)、流速 (Speed) の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、三宅島地区では図 1 の 25 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数 (Direcfct) に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係プロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと (図 2)、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果 (Year)、季節効果 (Quarter: 12 ヶ月を 1～3 月、4～6 月、7～9 月、10～12 月に 4 等分) については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} +$$

Temperature_0 + Temperature_100 + Temperature_200 + Temperature_400 + Temperature_Bottom
 +
 Speed_0 + Speed_100 + Speed_200 + Speed_400 + Speed_Bottom +
 Direcft_0 + Direcft_100 + Direcft_200 + Direcft_400 + Direcft_Bottom +
 Lat_139 +
 Lat138_139 + Lat139_140 + Lat140_141

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準（AIC）によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル（例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの）は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された（表 1）。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Temperature_Bottom} + \text{Speed}_0$$

三宅島地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 11 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小 AIC+2 のモデルをみると、ベストモデルで選択された説明変数のほかに、多くのモデルで黒潮入込の指標や底層の流速が含まれており、黒潮の影響や漁場内の流れに関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された説明変数に対する CPUE の応答（図 4）においても、漁場内の流速や水温による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった（図 5）。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった（図 6）。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は、2007 年以降、2012 年まで横ばい傾向であったが 2013～2014 年に増加、2014 年以降は変動しつつも横ばい傾向にある。ただし、2021 年以降は、3 年連続して減少した。標準化 CPUE とノミナル CPUE の値に大きな違いはみられなかったが、2007 年、2009～2010 年はノミナル CPUE のほうが、2017 年以降は標準化 CPUE のほうが顕著に高かった。

3.2 昨年度結果との比較

今年度のベストモデルで選択された説明変数は、昨年度のものと同様であり、ベストモデルから得られた標準化 CPUE とのトレンドに昨年度との大きな違いはなかった。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の

漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf

亘 真吾・竹茂愛吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・半沢祐大 (2024) 令和 5 (2023) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2024-AC037, 令和 5 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 69pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2024/03/details_2023_37.pdf

亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和 3 (2021) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和 3 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2007	0.92	0.84	0.71	0.96	0.08
2008	0.99	0.97	0.87	1.07	0.05
2009	0.93	0.81	0.66	1.01	0.11
2010	1.03	0.91	0.60	1.30	0.19
2011	0.77	0.80	0.69	0.93	0.07
2012	0.70	0.69	0.61	0.80	0.07
2013	1.03	0.97	0.80	1.16	0.10
2014	1.20	1.23	1.06	1.46	0.08
2015	1.06	0.99	0.83	1.17	0.09
2016	0.96	0.96	0.85	1.06	0.05
2017	1.30	1.33	1.13	1.53	0.08
2018	1.20	1.24	0.98	1.45	0.10
2019	1.04	1.11	1.01	1.22	0.05
2020	1.17	1.22	1.02	1.44	0.09
2021	1.08	1.15	1.01	1.27	0.06
2022	0.83	0.93	0.76	1.10	0.09
2023	0.78	0.83	0.70	0.97	0.08

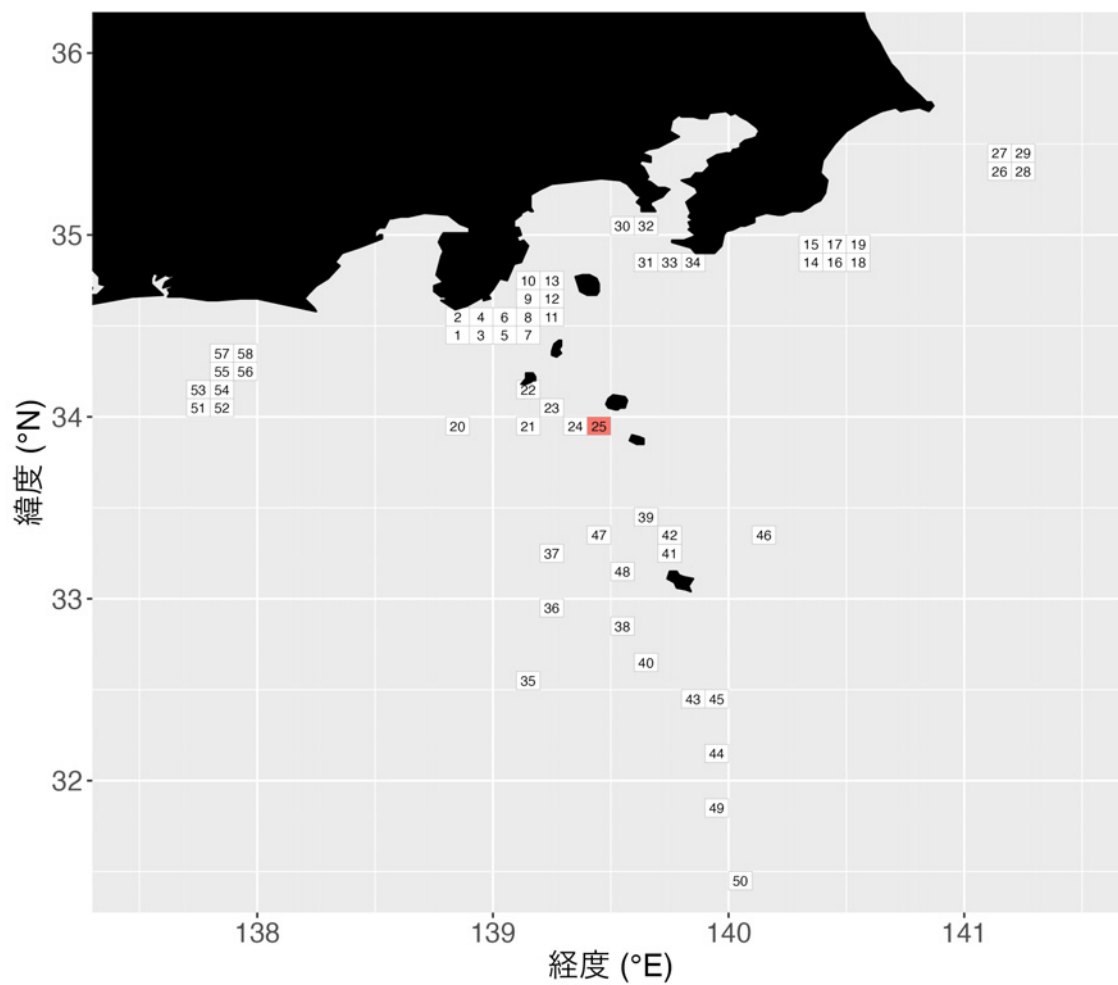


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。三宅島地区は25番のグリッドを使用。

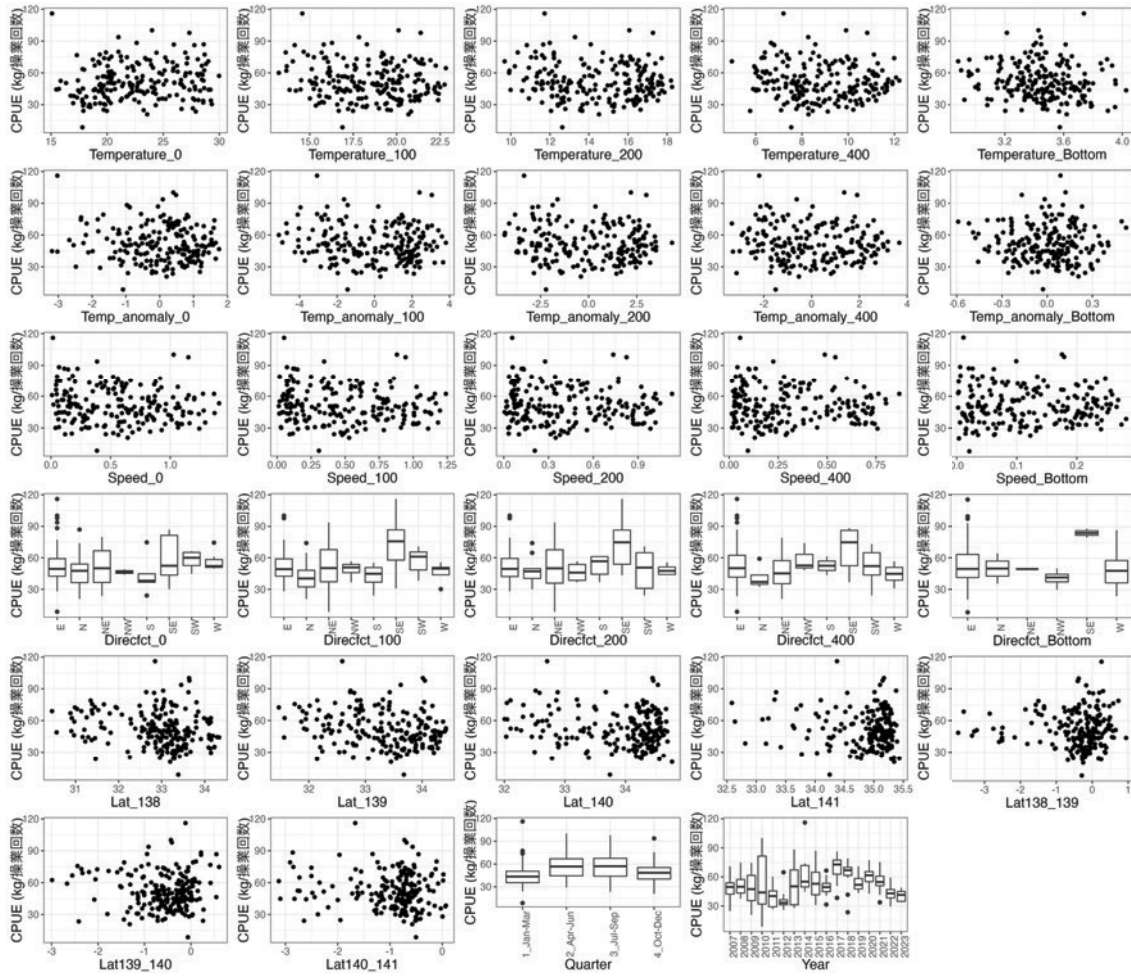


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

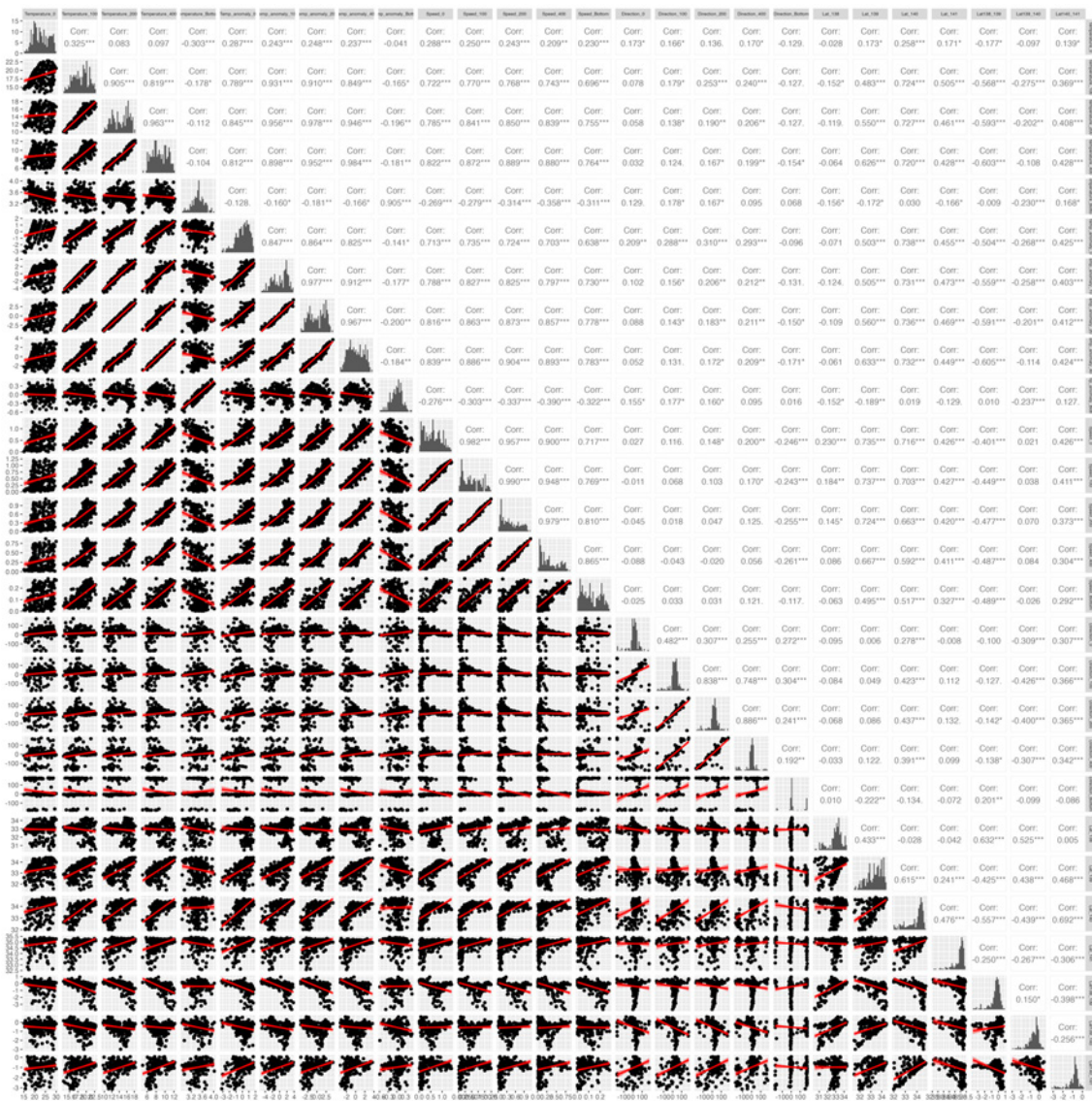


図3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

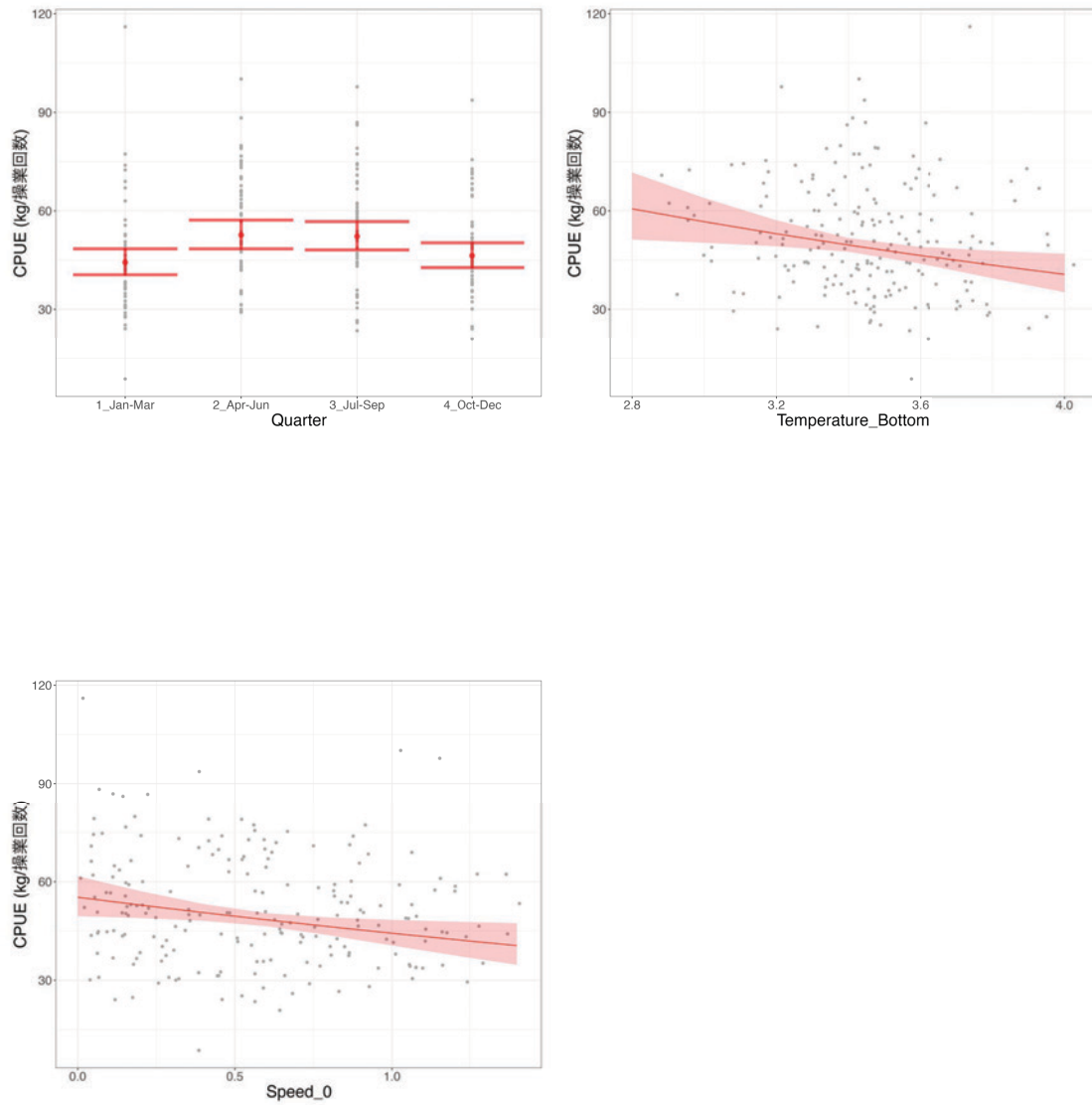


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

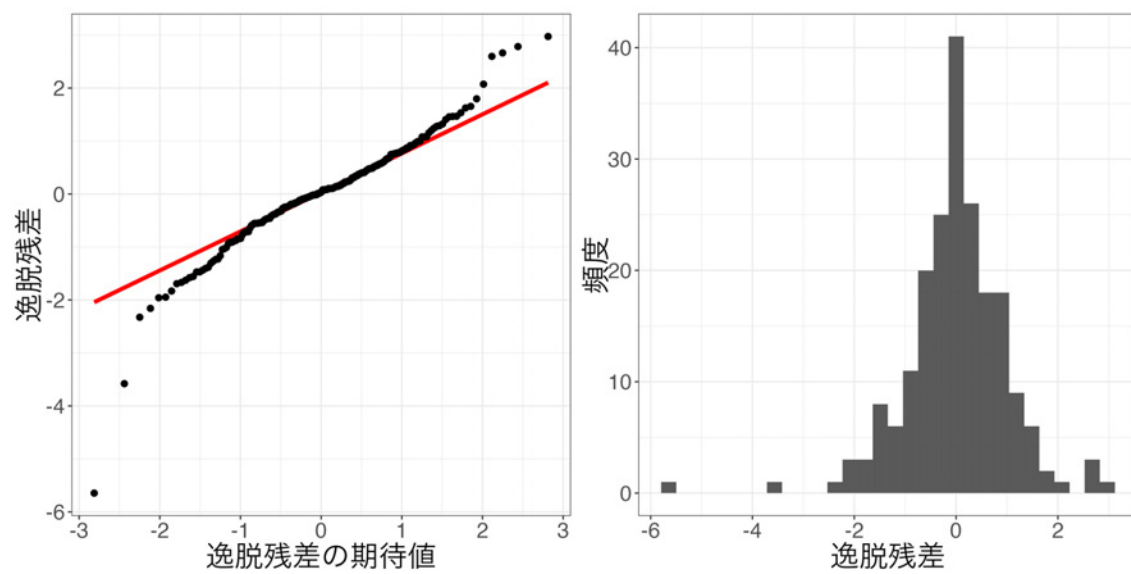


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

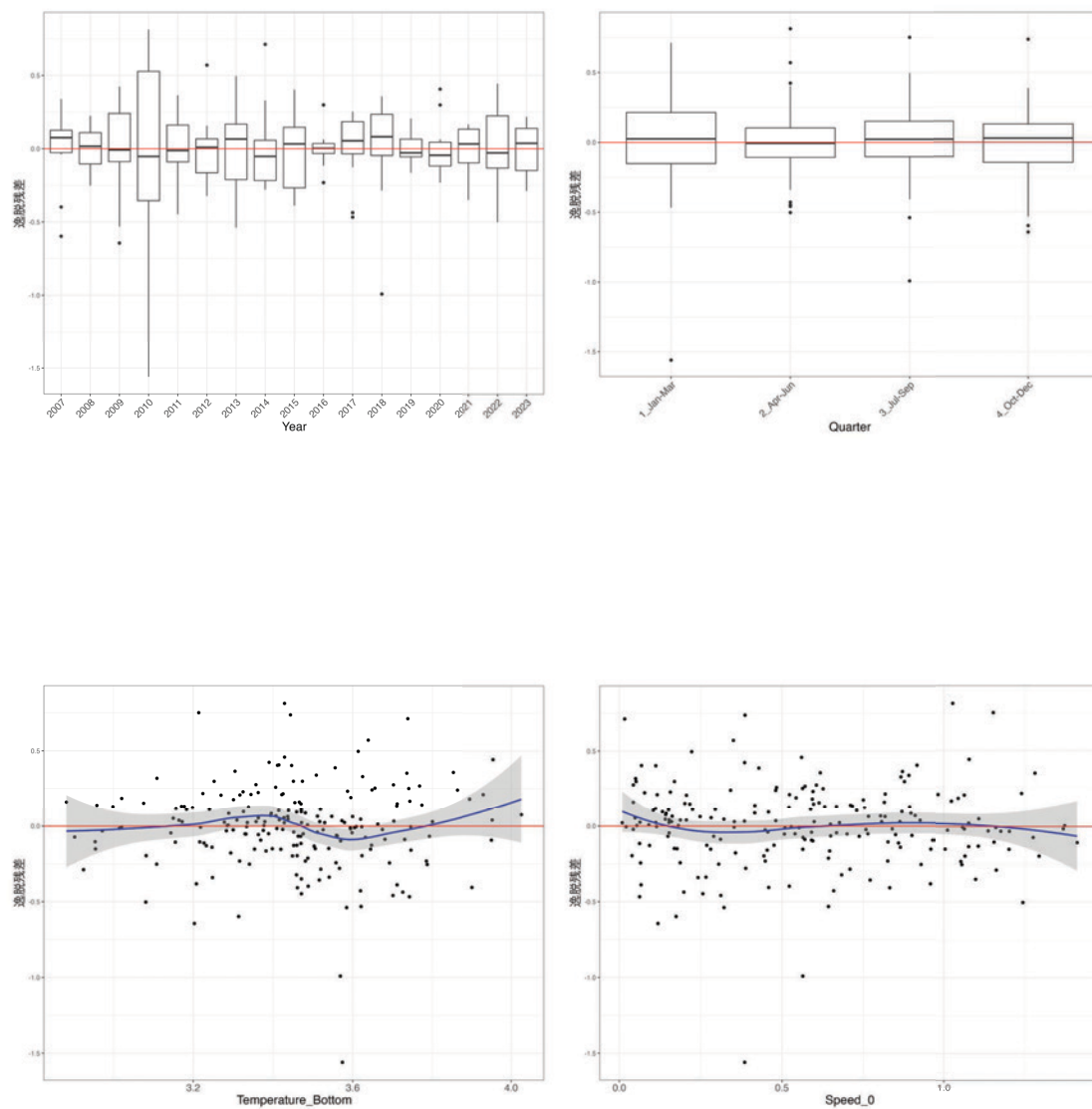


図 6. ベストモデルの層別逸脱残差 Temperature_Bottom、Speed_0 に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

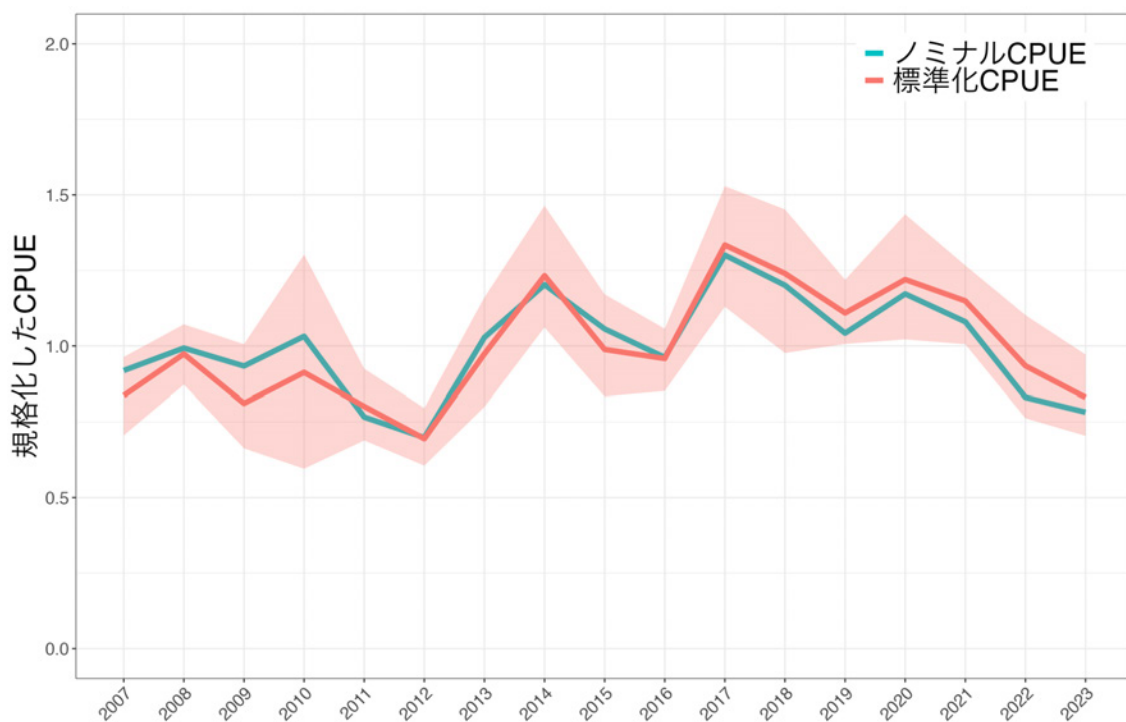


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Quarter + Speed_0 + Temperature_Bottom + Year + 1, family = gaussian, data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	4.910	0.450	10.919	0.0000	***
Quarter2_Apr-Jun	0.172	0.065	2.655	0.0086	**
Quarter3_Jul-Sep	0.164	0.064	2.588	0.0104	*
Quarter4_Oct-Dec	0.045	0.062	0.720	0.4722	
Speed_0	-0.221	0.091	-2.423	0.0164	*
Temperature_Bottom	-0.335	0.127	-2.640	0.0090	**
Year2008	0.152	0.121	1.251	0.2124	
Year2009	-0.031	0.120	-0.260	0.7951	
Year2010	0.087	0.124	0.702	0.4833	
Year2011	-0.044	0.124	-0.351	0.7257	
Year2012	-0.186	0.121	-1.539	0.1254	
Year2013	0.152	0.122	1.241	0.2163	
Year2014	0.387	0.124	3.129	0.0020	**
Year2015	0.166	0.123	1.352	0.1780	
Year2016	0.136	0.124	1.097	0.2740	
Year2017	0.466	0.126	3.707	0.0003	***
Year2018	0.393	0.124	3.171	0.0018	**
Year2019	0.282	0.127	2.217	0.0278	*
Year2020	0.377	0.135	2.796	0.0057	**
Year2021	0.317	0.128	2.484	0.0139	*
Year2022	0.111	0.134	0.822	0.4119	
Year2023	-0.007	0.136	-0.055	0.9563	

Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05

Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)
----------	----------------	---------	----------

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.08515227)

Null deviance: 24.23 on 203 degrees of freedom

Residual deviance: 15.5 on 182 degrees of freedom

AIC: 99.13

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名		変数略記
年		Year
季節		Quarter
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(東京都・八丈島地区)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある東京都八丈島地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2006～2023年
標準化に使用した期間	2006～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS IIから取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、100m層流向、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経138度-139度)
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	年効果を含むモデルのうち、上記の基準によって選ばれたベストモデルにより計算された標準化CPUEは2009年～2010年にかけて増加した。その後は小さな増減はあるものの、横ばい傾向であったが、2022年以降2年連続で増加し、2023年は解析期間中の最高値を更新した。ノミナルCPUEの長期的なトレンドは標準化CPUEとは異なり、2018年まで変動しながらも横ばい傾向にあったが、2019年に若干の減少がみられた。2020年以降は微増傾向にあるものの、2023年現在も標準化CPUEほど高い水準には至っていない。2010年、2011年および2018年以降は標準化CPUEのほうが高い値となった。た

<p>だし、モデル選択の問題や、モデルが漁場内の海洋環境の違いを十分考慮できていなかった可能性から、現時点では適切な標準化 CPUE が得られていないと判断された。</p>
--

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。東京都八丈島地区のデータを用いてモデル選択を行った結果、赤池情報量規準（AIC）上位モデルにおいて年効果が選ばれなかったため、年効果を含むモデルからベストモデルを選択した。ベストモデルから得られた年トレンドでは、漁場内の水温と流向の影響による CPUE の低下が補正され、モデル診断結果も概ね良好であった。ただし、資源評価参画機関との協議の結果、八丈島地区では、上述のように AIC 上位モデルが年効果を含まないこと、現時点におけるデータ解像度の限界により適切なモデリングができていない可能性があると考えられたから、今年度は当該地区の標準化 CPUE を VPA のチューニング指数として導入しないこととなった。

今年度は、昨年度使用したデータセットに最新年のデータを追加し、引き続きモデルの検討を行った。しかし、昨年度同様、AIC 上位モデルは年効果を含まず、十分に課題点が解決されていないと考えられたことから、引き続き標準化 CPUE を資源量計算に導入することは困難と判断された。以下に、モデルと標準化 CPUE の詳細について、参考までに記述する。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある東京都の八丈島地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2006～2023年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM（log-normal GLM）である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報（<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>）から取得し、黒潮北縁（流軸から 13 海里）の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した（Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141）。八丈島地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 139 度における黒潮北縁緯度（Lat_139）を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差（すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141）を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II（Kuroda et al., 2017, データアクセス日：2024 年 4 月 4 日）における深度帯別（0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層）の水温（Temperature）、流向（Direction）、流速（Speed）の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、八丈島地区では図 1 の 40 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数（Direcfect）に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係性をプロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと（図 2）、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果（Year）、季節効果（Quarter: 12 ヶ月を 1～3 月、4～6 月、7～9 月、10～12 月に 4

等分) については、それぞれカテゴリーカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \log(\text{CPUE}) \sim & \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{200} + \text{Temperature}_{400} + \text{Temperature}_{\text{Bottom}} \\ & + \\ & \text{Speed}_0 + \text{Speed}_{100} + \text{Speed}_{200} + \text{Speed}_{400} + \text{Speed}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Direcft}_0 + \text{Direcft}_{100} + \text{Direcft}_{200} + \text{Direcft}_{400} + \text{Direcft}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Lat}_{139} + \\ & \text{Lat138}_{139} + \text{Lat139}_{140} + \text{Lat140}_{141} \end{aligned}$$

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準 (AIC) によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル (例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの) は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95%信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づきモデル選択を実施したが、最小 AIC+2 の範囲のモデルには年効果が含まれていなかったため（表 1）、年効果を含むモデルにしぼり、そこから基準に従って以下のベストモデルを選択した（表 2）。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Direcft}_{100} + \text{Lat}_{138_139}$$

八丈島地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除き、年効果を含むモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 17 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。候補となった他のモデルをみると、ベストモデルで選択された説明変数されている黒潮の入込や漁場内の流速に加え、水温に関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数への CPUE の応答（図 4）からも、流向や黒潮入込による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった（図 5）。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった（図 6）。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 3 に示す。標準化 CPUE は 2009 年から 2010 年にかけて増加した。その後は小さな増減はあるものの、2021 年まで横ばい傾向であったが、2022 年以降 2 年連続で増加し、2023 年は解析期間中の最高値を更新した。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と異なり、2018 年まで変動しながらも横ばい傾向にあったが、2019 年に若干の減少がみられた。2020 年以降は微増傾向にあるものの、2023 年現在も標準化 CPUE ほど高い水準には至っていない。2010、2011 年および 2018 年以降は標準化 CPUE のほうが高い結果となった。

以上のとおり、八丈島地区では AIC 上位モデルに年効果が含まれず、年効果を含むモデルの中からベストモデルを選択した。一方、八丈島地区の代表的な漁場として図 1 の 40 番グリッドの海洋環境データを使用した。当該地区の漁場は 35～50 番グリッドまでの広い範囲に存在する。そこで今年度は、資源評価参画機関を通じた漁業者への聞き取りにより得たグリッドごとの漁獲努力量配分の年変化により海洋環境データを重み付けしたものを説明変数として用いた計算も検討したが、同様に AIC 上位モデルに年効果を含むものはな

かった。他海域より広域な漁場に対し、漁場内の海洋環境の違いを十分に考慮できていない可能性も考えられたため、今年度推定した標準化 CPUE をキンメダイ太平洋系群における資源量計算に使用するのとは適切ではないと判断された。過去の情報について精査し、限定された情報であっても CPUE の標準化を行い、資源評価の高度化をめざす必要がある。

3.2 昨年度結果との比較

今年度、年効果を含むモデル候補の中から選択されたベストモデルの説明変数には、昨年度含まれていた 0 m 層流向や 400 m 層水温は含まれず、100 m 層流向が含まれていた。一方、昨年度は含まれていなかった東経 138～139 度における黒潮北縁の緯度差が今年度は含まれていたが、標準化 CPUE のトレンドに大きな変化は認められなかった。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf
- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和 3 (2021) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和 3 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 3. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2006	0.88	0.86	0.62	1.08	0.14
2007	1.00	0.90	0.71	1.10	0.11
2008	0.96	0.70	0.34	1.14	0.32
2009	1.16	0.95	0.72	1.25	0.15
2010	1.03	1.11	0.86	1.43	0.13
2011	1.07	1.11	0.93	1.28	0.08
2012	1.00	0.99	0.84	1.12	0.07
2013	1.26	1.03	0.73	1.39	0.16
2014	1.03	1.00	0.86	1.15	0.07
2015	0.93	0.85	0.69	1.02	0.10
2016	0.97	0.89	0.73	1.05	0.09
2017	1.02	0.92	0.73	1.10	0.11
2018	1.06	1.11	0.92	1.34	0.10
2019	0.78	0.99	0.78	1.32	0.14
2020	0.91	1.01	0.85	1.28	0.11
2021	0.85	0.92	0.74	1.18	0.12
2022	0.93	1.13	0.91	1.46	0.13
2023	1.16	1.53	1.17	2.21	0.18

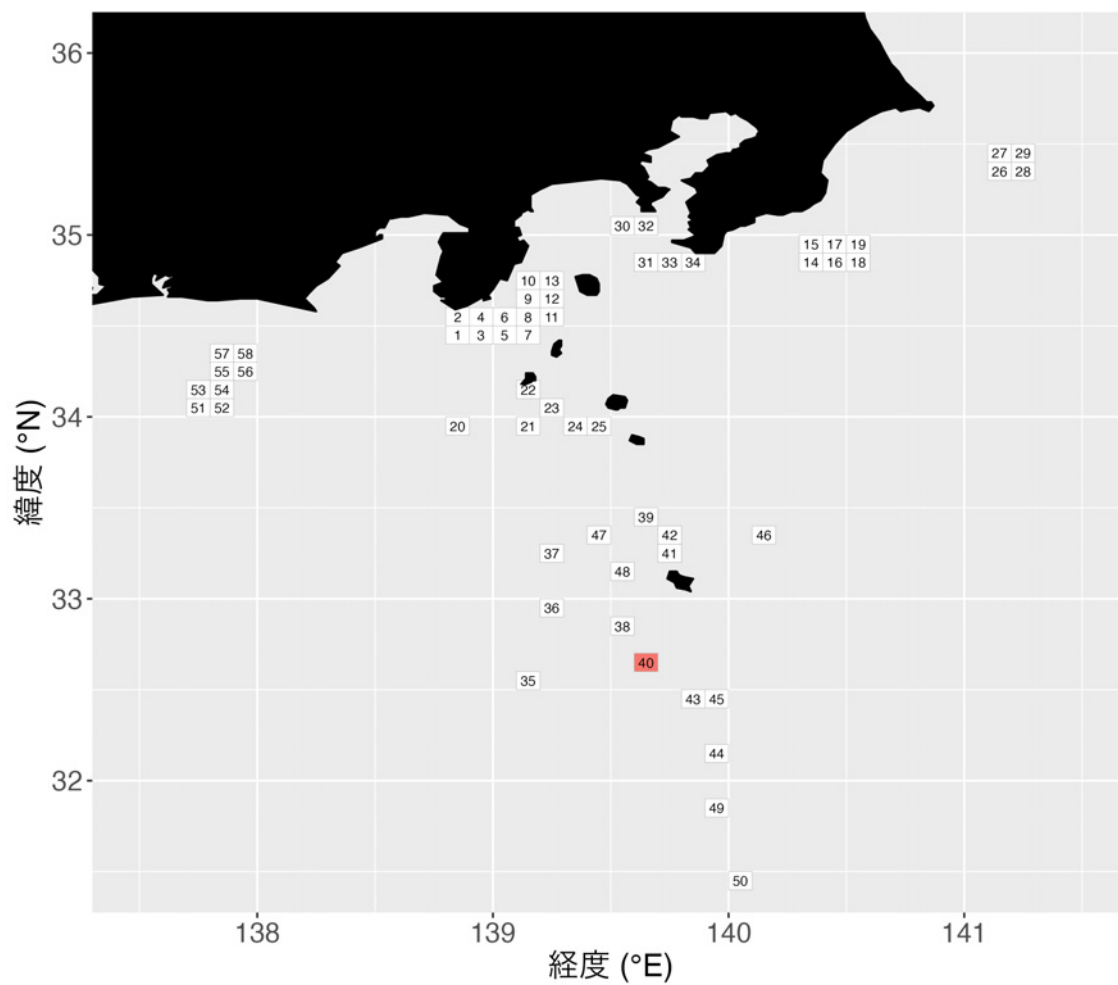


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。八丈島地区は40番のグリッドを使用。

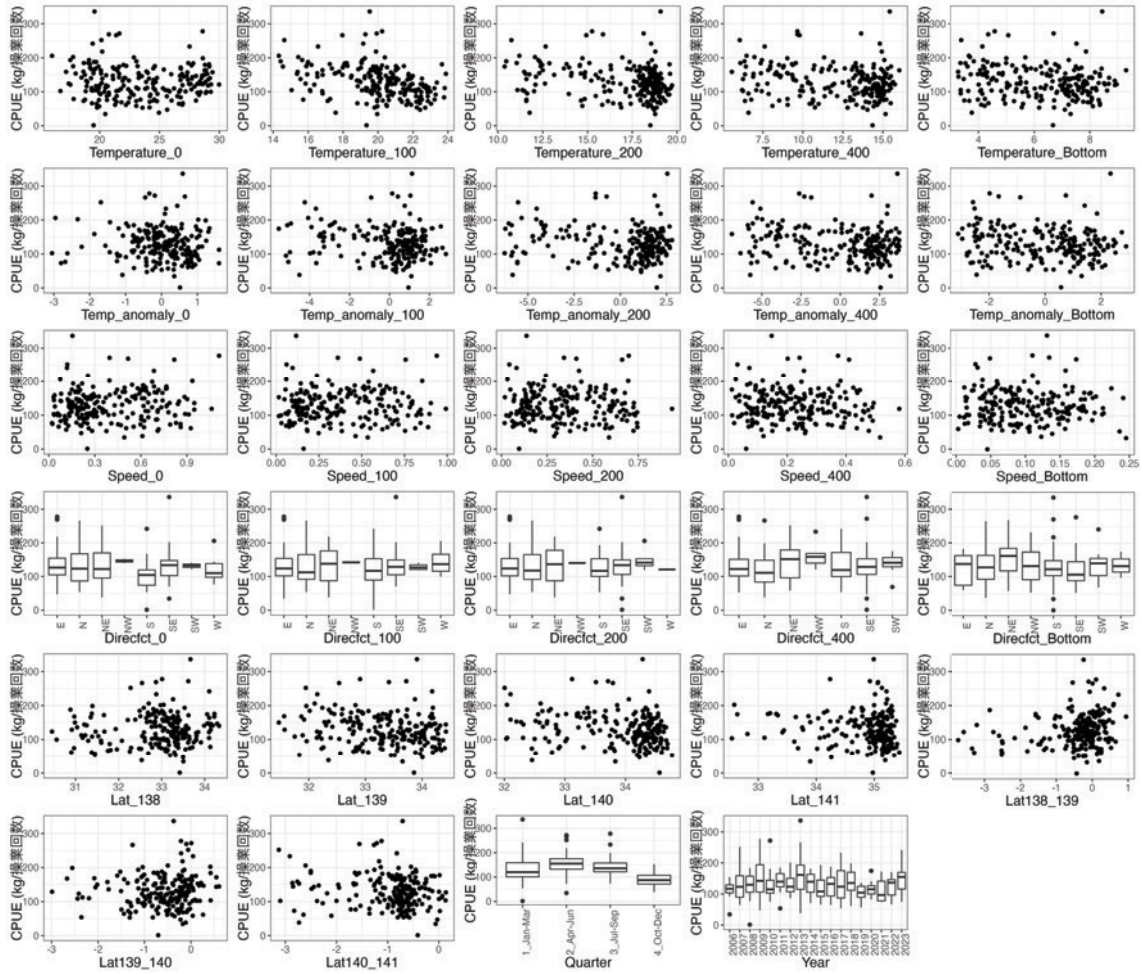


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

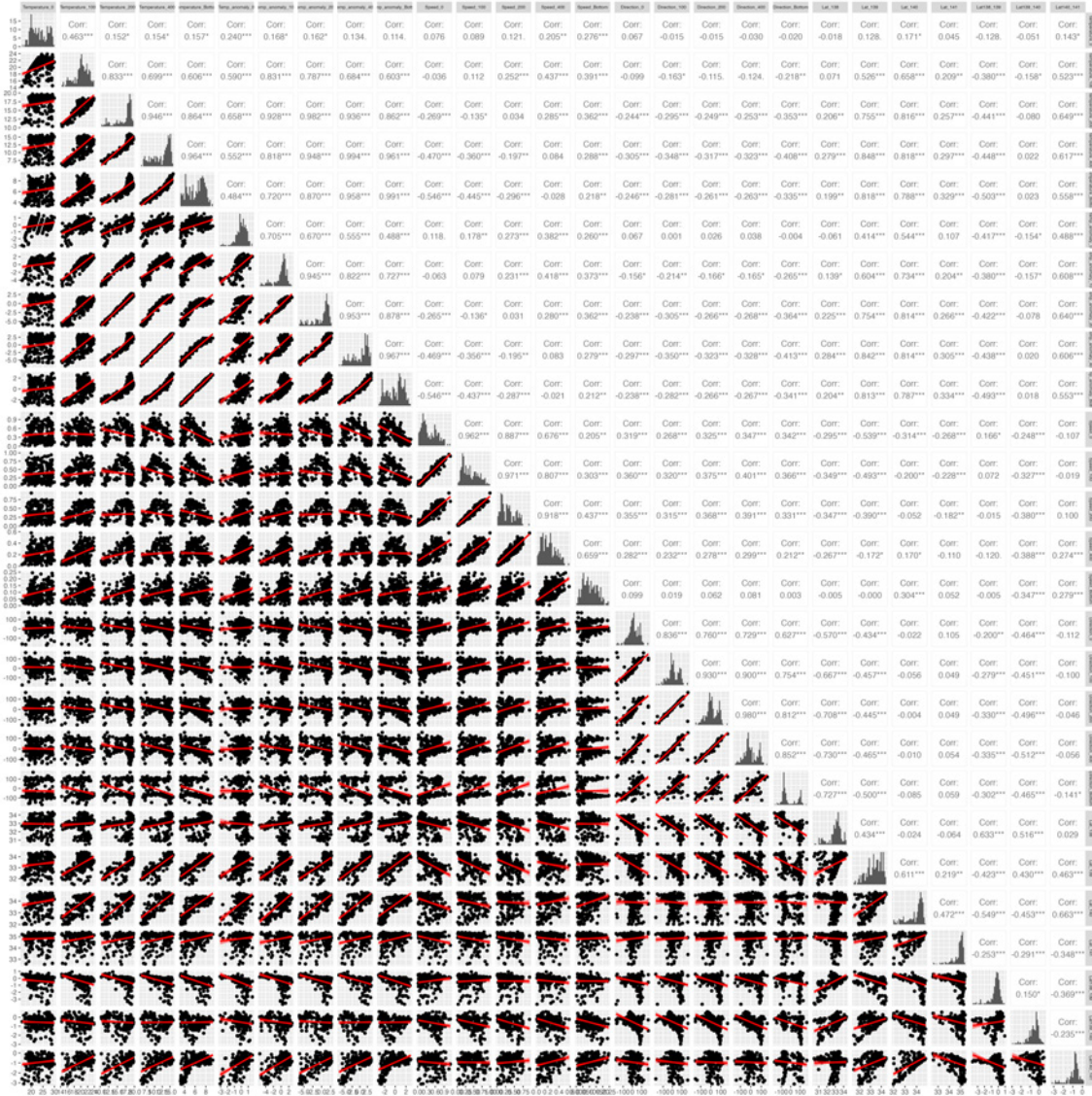


図3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

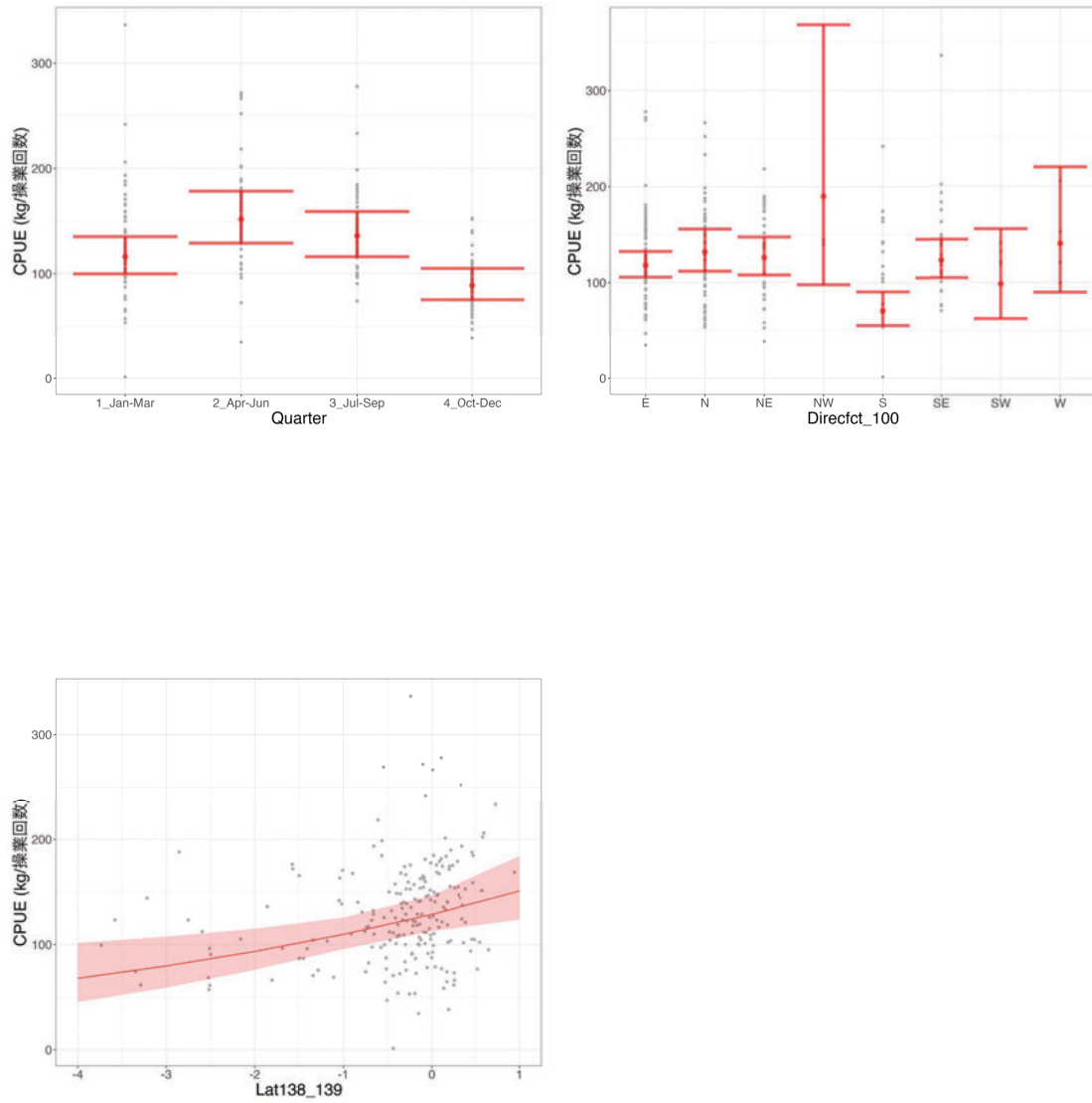


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

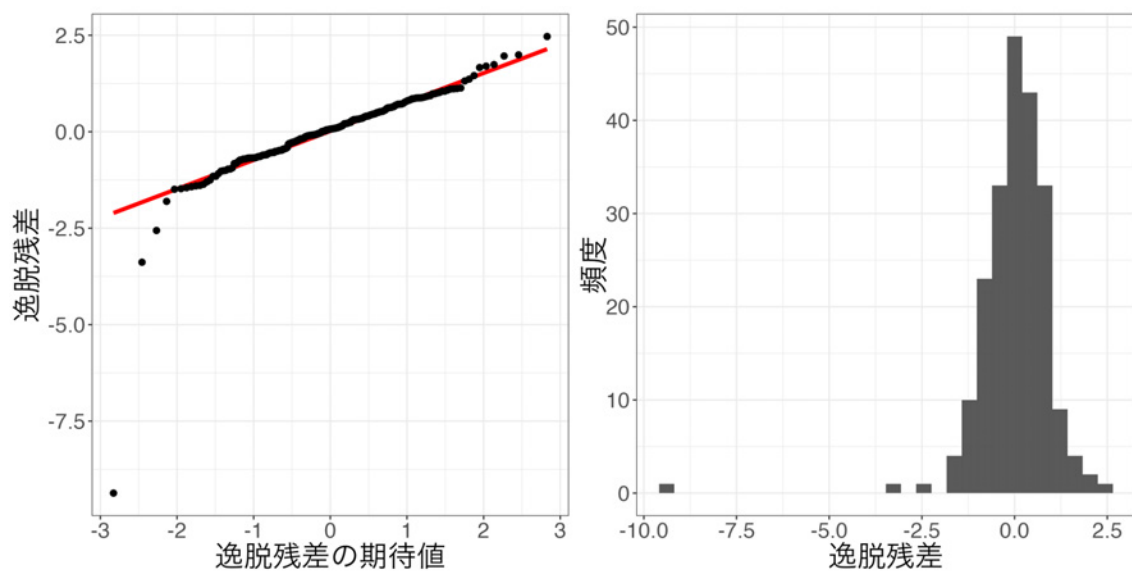


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

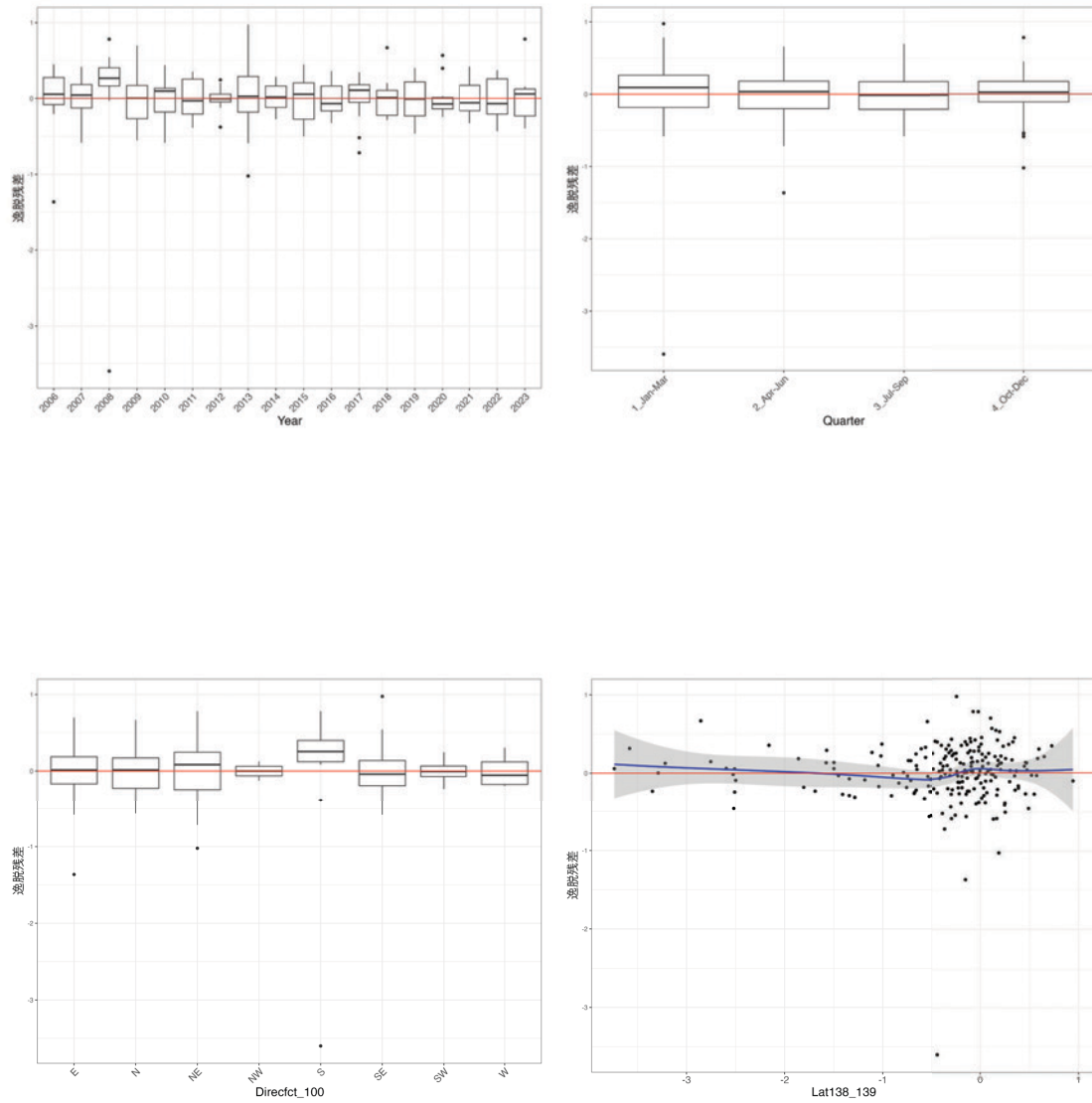


図 6. ベストモデルの層別逸脱残差 Lat138_139 に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

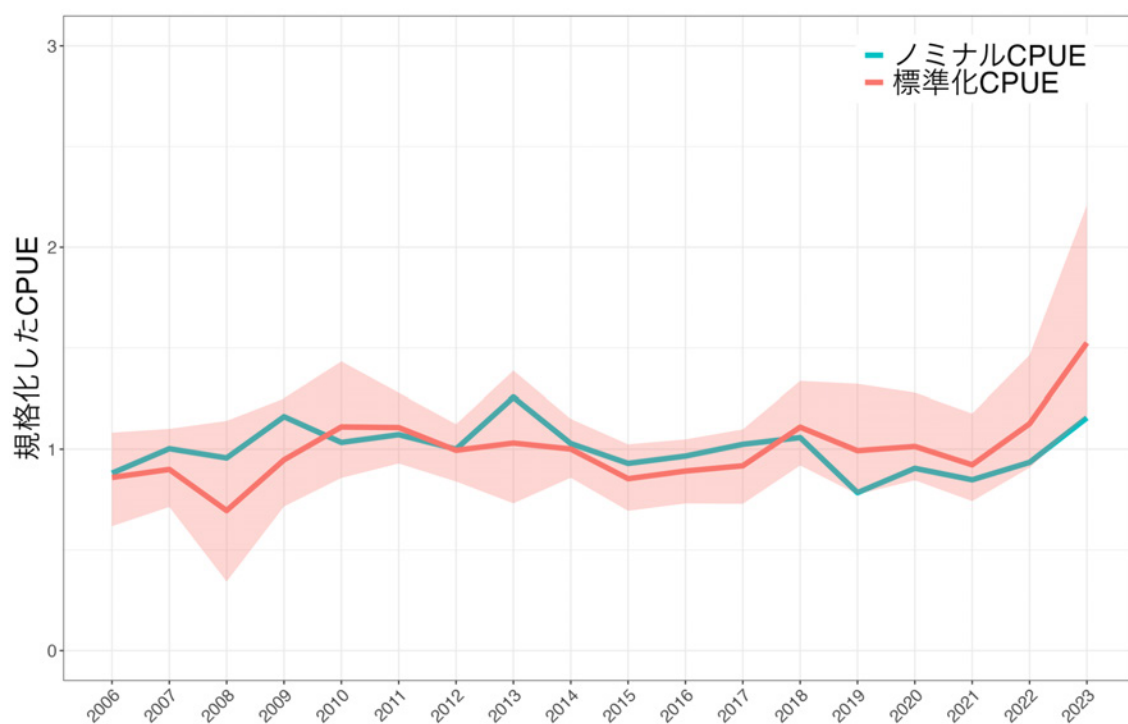


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Direcft_100 + Lat138_139 + Quarter + Year + 1, family = gaussian,
data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	4.659	0.133	35.000	0.0000	***
Direcft_100N	0.109	0.114	0.961	0.3378	
Direcft_100NE	0.065	0.097	0.668	0.5051	
Direcft_100NW	0.472	0.346	1.365	0.1740	
Direcft_100S	-0.515	0.141	-3.655	0.0003	***
Direcft_100SE	0.042	0.103	0.403	0.6873	
Direcft_100SW	-0.183	0.242	-0.755	0.4513	
Direcft_100W	0.173	0.234	0.740	0.4603	
Lat138_139	0.160	0.055	2.923	0.0039	**
Quarter2_Apr-Jun	0.267	0.084	3.176	0.0018	**
Quarter3_Jul-Sep	0.157	0.085	1.848	0.0663	.
Quarter4_Oct-Dec	-0.268	0.085	-3.165	0.0018	**
Year2007	0.045	0.180	0.253	0.8009	
Year2008	-0.212	0.183	-1.159	0.2479	
Year2009	0.097	0.182	0.533	0.5946	
Year2010	0.256	0.187	1.367	0.1731	
Year2011	0.253	0.178	1.421	0.1571	
Year2012	0.146	0.175	0.835	0.4049	
Year2013	0.181	0.184	0.986	0.3252	
Year2014	0.152	0.175	0.867	0.3873	
Year2015	-0.007	0.179	-0.040	0.9682	
Year2016	0.037	0.177	0.207	0.8365	
Year2017	0.065	0.189	0.345	0.7302	
Year2018	0.255	0.210	1.215	0.2258	

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
Year2019	0.144	0.213	0.675	0.5007	
Year2020	0.165	0.196	0.841	0.4015	
Year2021	0.070	0.205	0.343	0.7322	
Year2022	0.270	0.185	1.460	0.1461	
Year2023	0.573	0.201	2.857	0.0048	**

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.1802981)

Null deviance: 50.13 on 213 degrees of freedom

Residual deviance: 33.36 on 185 degrees of freedom

AIC: 269.53

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名	変数略記	
年	Year	
季節	Quarter	
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(静岡県・伊東地区)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある静岡県伊東地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2000～2023年
標準化に使用した期間	2000～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS IIから取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、底層流速、地先における黒潮北縁の緯度(東経139度)、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経139度-140度)
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	標準化CPUEは2009年頃まで横ばい傾向であったが、2010年から2013年にかけて減少した。その後は増減を繰り返しながらも減少傾向にあったが、2023年は前年から増加した。ノミナルCPUEの長期的なトレンドは標準化CPUEと類似した一方、2003～2004年および2018年以降は標準化CPUEのほうが顕著に高い値となった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。静岡県の伊東地区のデータを用いて推定を行った結果、黒潮や漁場内の流速の影響による CPUE の低下が補正され、モデル診断結果も概ね良好であったことから、このモデルから得られた年トレンドを、キンメダイ太平洋系群の VPA のチューニング指数の 1 つとして利用することとなった。

今年度も昨年度に引き続き、最新年のデータを追加した上で静岡県伊東地区の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある静岡県の伊東地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2000～2023 年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM（log-normal GLM）である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に

影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁（流軸から 13 海里）の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した (Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141)。伊東地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 139 度における黒潮北縁緯度 (Lat_139) を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差（すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141) を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日：2024 年 4 月 4 日) における深度帯別 (0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層) の水温 (Temperature)、流向 (Direction)、流速 (Speed) の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、伊東地区では図 1 の 10 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。一方、10 番のグリッドでは水深が浅いことから、水温、流向、流速は 0 m 層、100 m 層、底層の再解析値のみを用いた。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数 (Direcft) に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係プロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと (図 2)、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果 (Year)、季節効果 (Quarter: 12 ヶ月を 1~3 月、4~6 月、7~9 月、10~12 月に 4 等分) については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \log(\text{CPUE}) \sim & \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Speed}_0 + \text{Speed}_{100} + \text{Speed}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Direcft}_0 + \text{Direcft}_{100} + \text{Direcft}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Lat}_{139} + \\ & \text{Lat138}_{139} + \text{Lat139}_{140} + \text{Lat140}_{141} \end{aligned}$$

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準（AIC）によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル（例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの）は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された（表 1）。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Speed_Bottom} + \text{Lat}_{139} + \text{Lat}_{139_140}$$

伊東地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 8 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小 AIC+2 の範囲の他のモデルをみると、水温が選ばれる場合もあったが、全てのモデルで共通して底層流速、東経 139 度における黒潮北縁の緯度、東経 139～140 度における黒潮北縁の緯度差が含まれており、黒潮の影響や漁場内の流れに関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数への CPUE の応答（図 4）からも、黒潮や漁場内の流速による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性についても大きな問題が見られなかった（図 5）。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった（図 6）。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は 2000 年以降、2009 頃まで増減を繰り返しながらも横ばい傾向であったが、2010 年から 2013 年にかけて減少した。その後は増減を繰り返しながらも減少傾向にあったが、2023 年は前年から増加した。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と類似した一方、2003～2004 年および 2018 年以降は標準化 CPUE のほうが顕著に高い値となった。それ以外はノミナル CPUE のほうが高い年が多く、特に 2000 年、2001 年、2008 年、2009 年、2015～2017 年はノミナル CPUE の値が標準化 CPUE よりも顕著に大きかった。

3.2 昨年度結果との比較

今年度のベストモデルで選択された説明変数は、昨年度のものと同様であり、ベストモデルから得られた標準化 CPUE とのトレンドに昨年度との大きな違いはなかった。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf

亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和 3 (2021) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和 3 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもの
のうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向			黒潮北緯緯度	経度間の黒潮北緯の緯度差			流速			水温			季節	年	df	logLik	AIC	delta
	0	100	底	東経139度	138-139	139-140	140-141	0	100	底	0	100	底						
9.58				-0.16		0.12					-3.91	-0.02		+	+	32	-72.7	209.4	0.0
9.47				-0.16		0.13					-4.04			+	+	31	-73.9	209.7	0.3
9.09			+	-0.14		0.11					-4.64	-0.02		+	+	39	-66.5	211.0	1.6
9.13				-0.14	0.02	0.12					-3.86	-0.02		+	+	33	-72.5	211.0	1.6
9.21				-0.16		0.13					-3.95		0.02	+	+	32	-73.5	211.0	1.6
8.95			+	-0.15		0.11					-4.74			+	+	38	-67.6	211.1	1.7
9.02				-0.15	0.02	0.12					-3.98			+	+	32	-73.6	211.3	1.9
9.75				-0.16		0.13	0.01				-3.89	-0.02		+	+	33	-72.7	211.4	2.0

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2000	1.63	1.53	1.31	1.78	0.08
2001	1.54	1.33	1.12	1.55	0.09
2002	0.94	0.98	0.80	1.22	0.11
2003	1.22	1.34	1.14	1.57	0.08
2004	1.10	1.21	0.96	1.48	0.11
2005	1.35	1.29	0.96	1.70	0.14
2006	1.60	1.66	1.44	1.94	0.08
2007	1.35	1.35	1.17	1.53	0.07
2008	1.40	1.33	1.12	1.57	0.08
2009	1.43	1.26	1.07	1.49	0.08
2010	1.01	1.03	0.83	1.25	0.11
2011	1.07	1.10	0.92	1.28	0.09
2012	0.93	0.91	0.72	1.12	0.11
2013	0.75	0.69	0.58	0.82	0.09
2014	0.90	0.90	0.76	1.06	0.08
2015	0.92	0.83	0.71	0.95	0.07
2016	1.04	0.96	0.77	1.22	0.12
2017	0.88	0.80	0.67	0.95	0.09
2018	0.63	0.66	0.56	0.76	0.08
2019	0.40	0.50	0.41	0.58	0.08
2020	0.49	0.63	0.49	0.79	0.12
2021	0.64	0.78	0.63	0.93	0.10
2022	0.35	0.40	0.30	0.52	0.14
2023	0.43	0.53	0.40	0.68	0.13

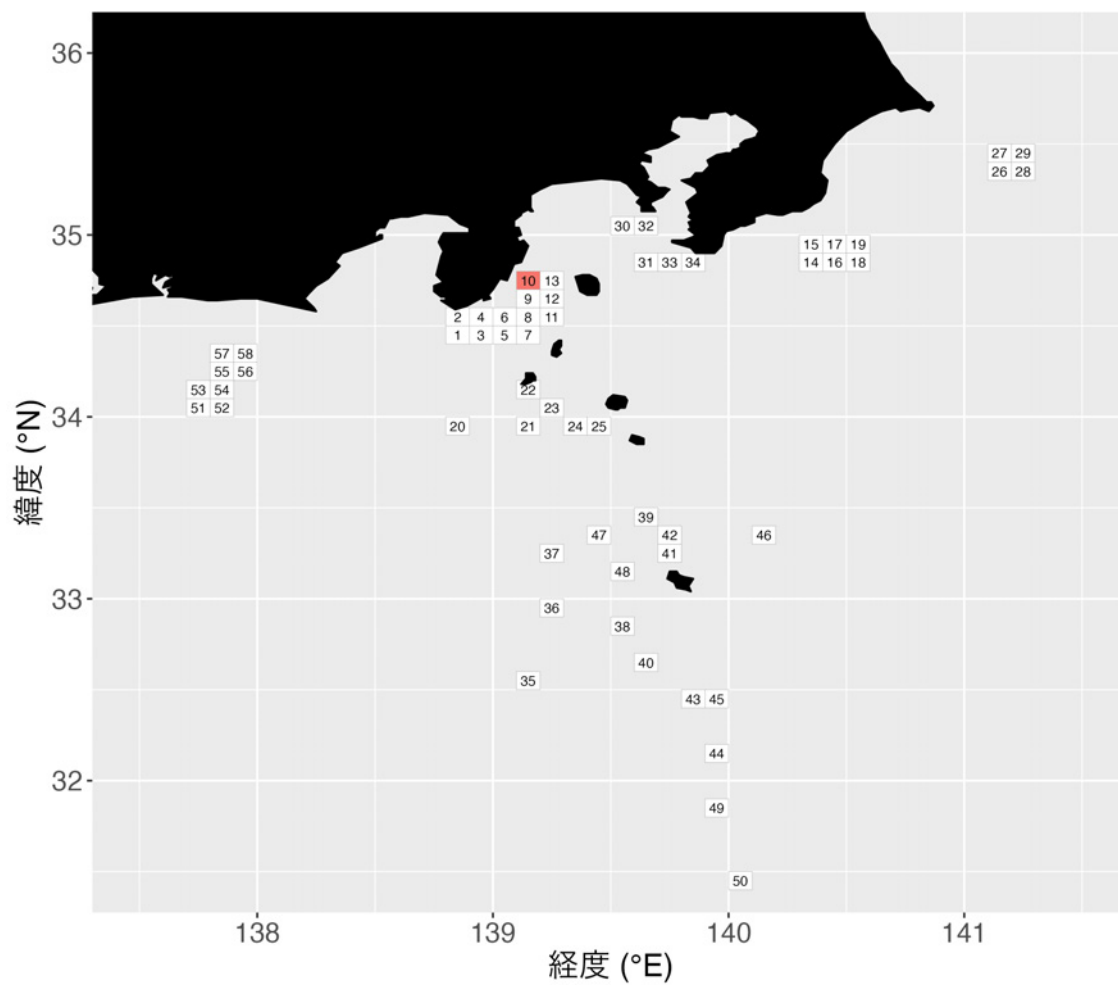


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。伊東地区は10番のグリッドを使用。

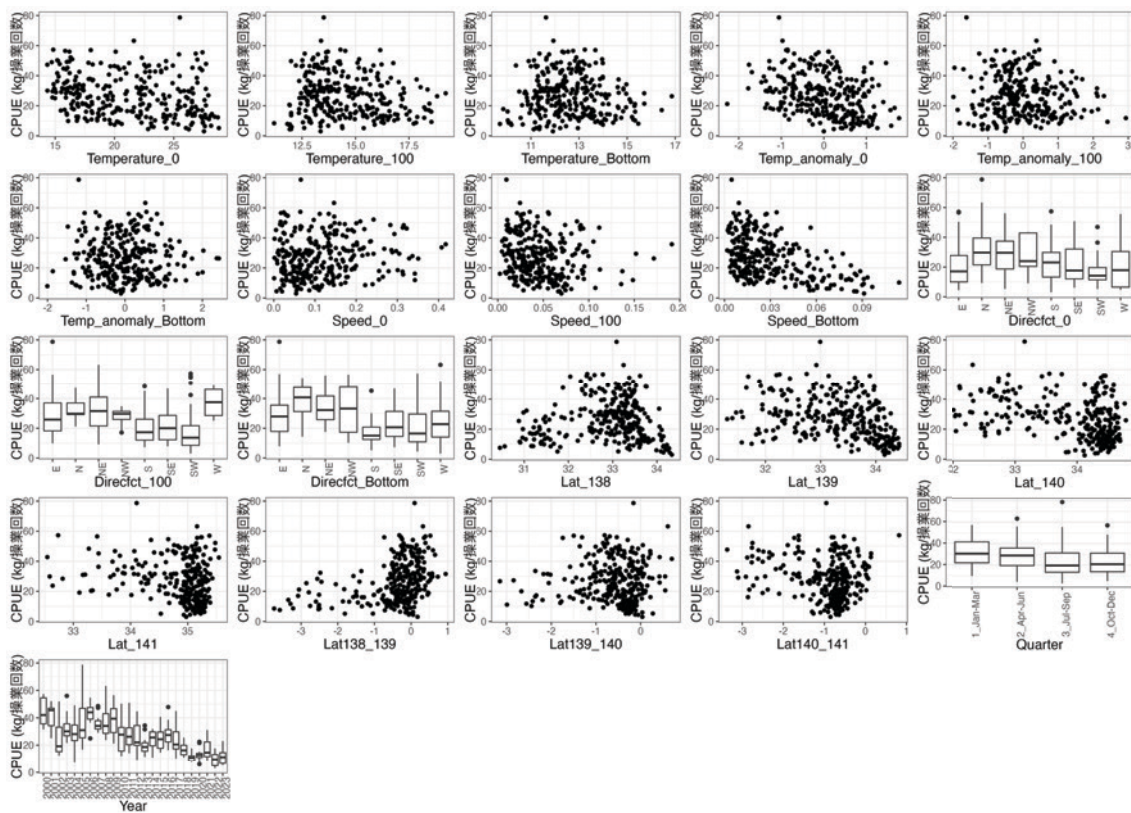


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

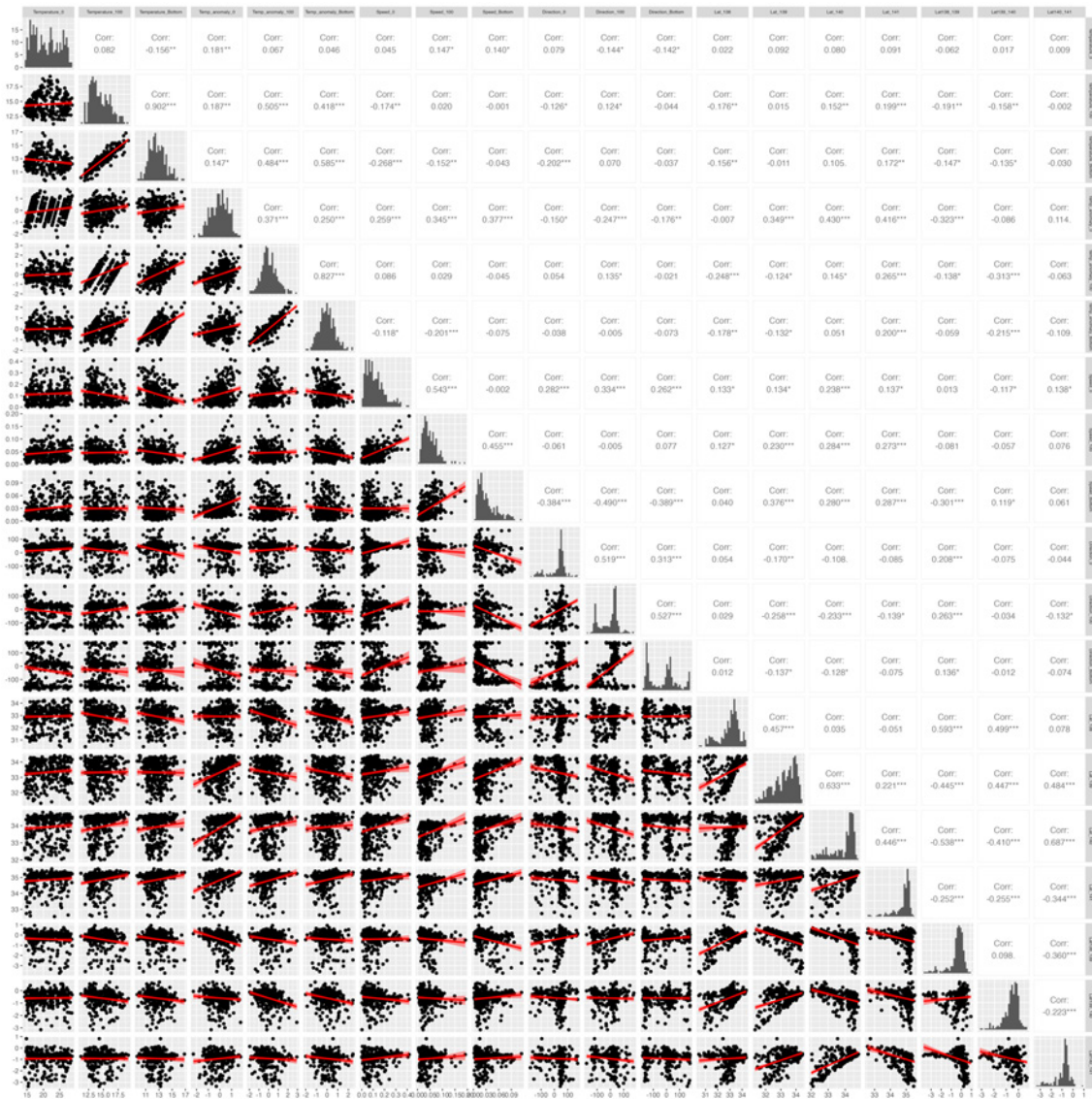


図 3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

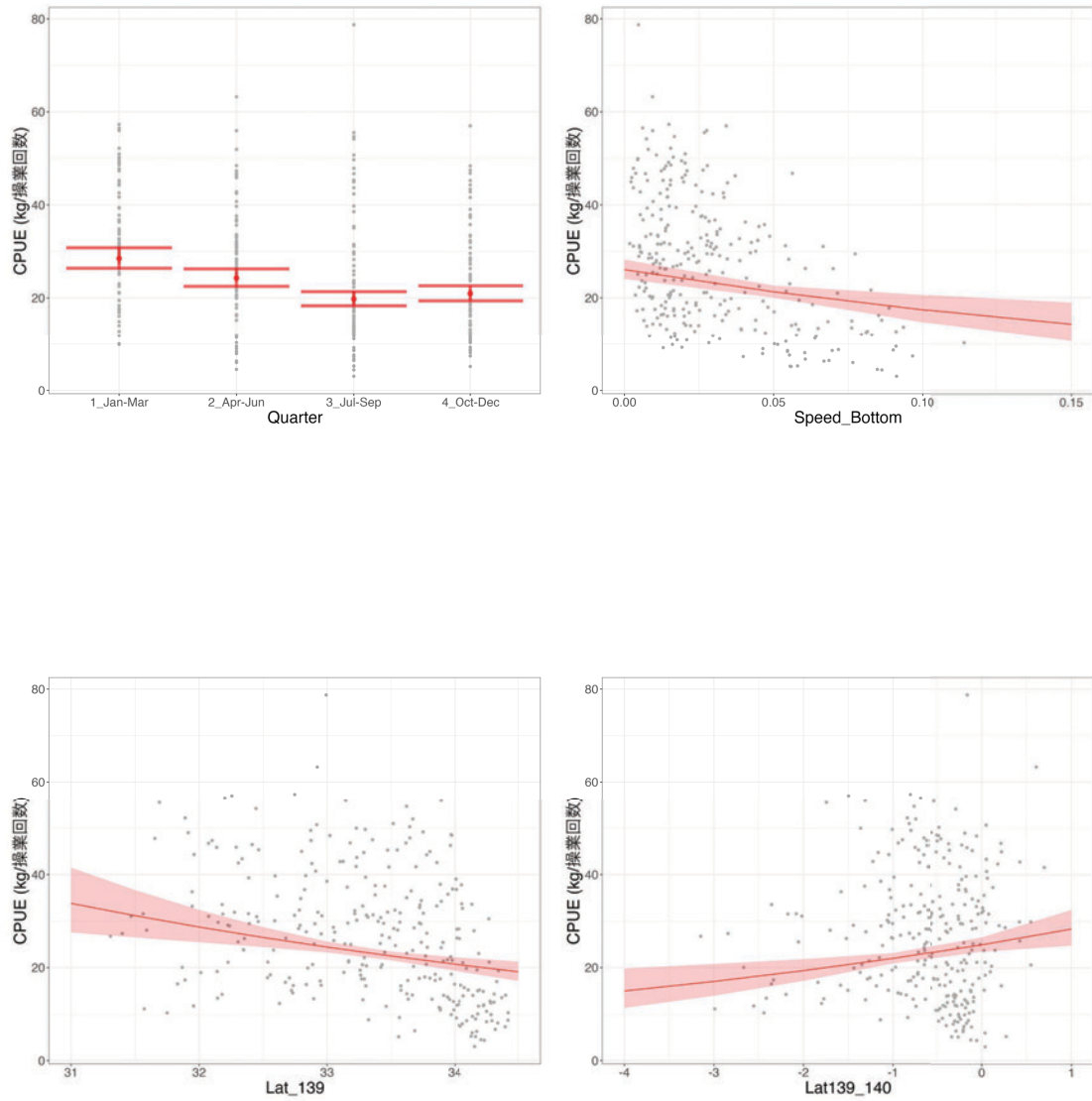


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

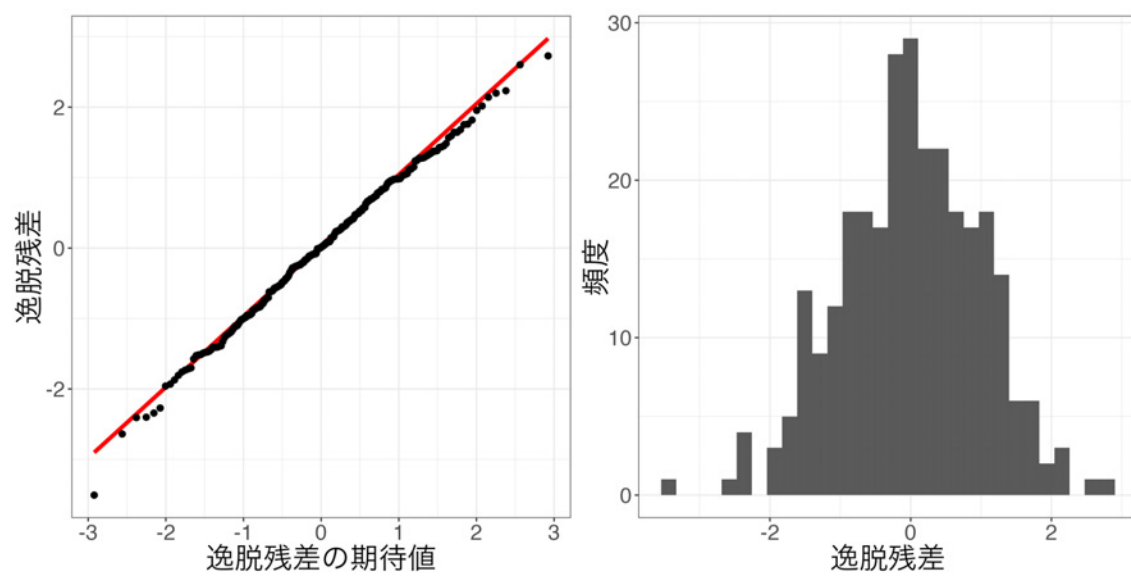


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

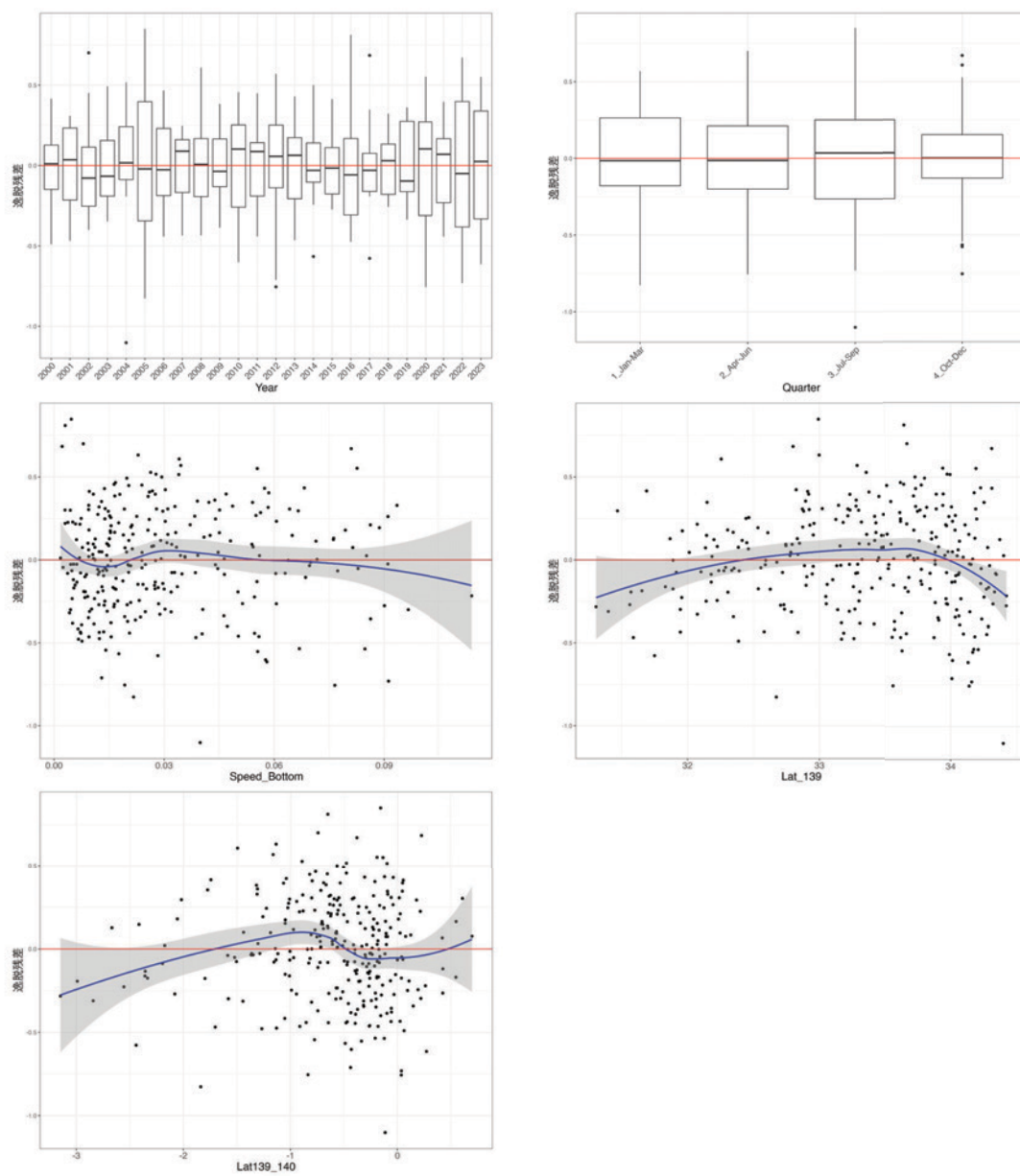


図 6. ベストモデルの層別逸脱残差 Speed_Bottom、Lat_139、Lat139_140 に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

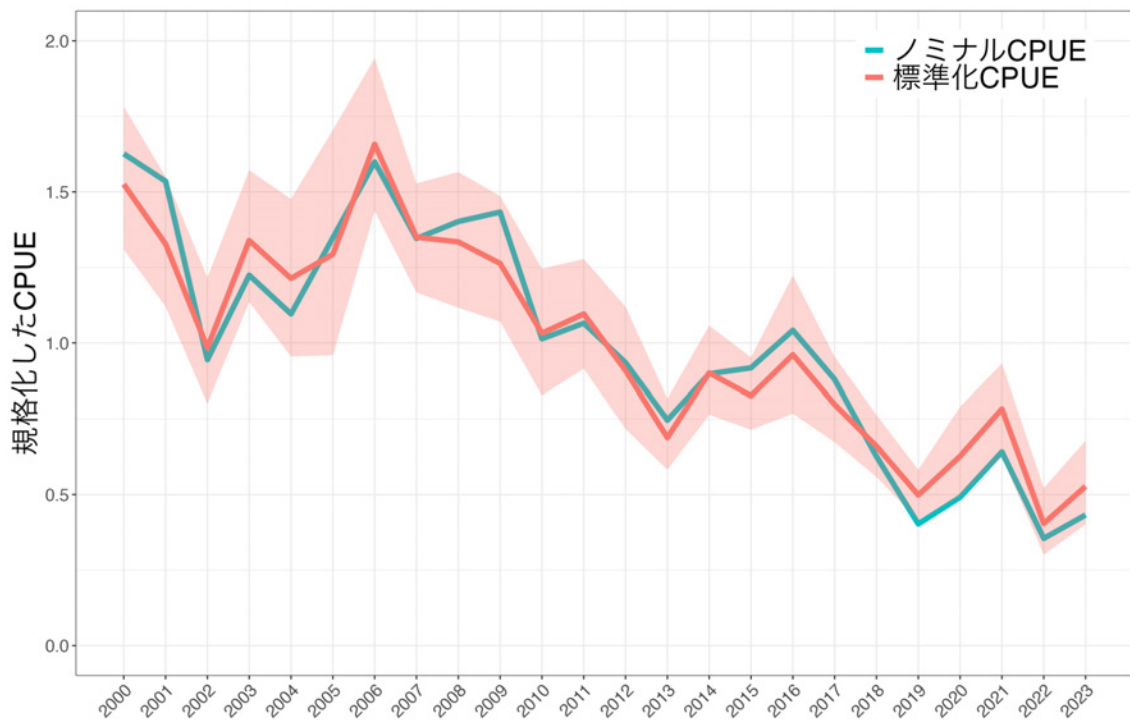


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Lat_139 + Lat139_140 + Quarter + Speed_Bottom + Year + 1, family = gaussian, data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	9.465	1.450	6.528	0.0000	***
Lat_139	-0.163	0.044	-3.709	0.0003	***
Lat139_140	0.128	0.041	3.096	0.0022	**
Quarter2_Apr-Jun	-0.159	0.055	-2.874	0.0044	**
Quarter3_Jul-Sep	-0.365	0.055	-6.596	0.0000	***
Quarter4_Oct-Dec	-0.308	0.056	-5.544	0.0000	***
Speed_Bottom	-4.035	1.188	-3.397	0.0008	***
Year2001	-0.139	0.136	-1.020	0.3085	
Year2002	-0.439	0.146	-3.010	0.0029	**
Year2003	-0.130	0.145	-0.898	0.3702	
Year2004	-0.229	0.148	-1.542	0.1243	
Year2005	-0.165	0.137	-1.206	0.2290	
Year2006	0.083	0.140	0.596	0.5519	
Year2007	-0.122	0.136	-0.899	0.3698	
Year2008	-0.134	0.137	-0.978	0.3288	
Year2009	-0.189	0.137	-1.380	0.1689	
Year2010	-0.390	0.142	-2.759	0.0062	**
Year2011	-0.331	0.141	-2.344	0.0198	*
Year2012	-0.518	0.139	-3.727	0.0002	***
Year2013	-0.795	0.137	-5.818	0.0000	***
Year2014	-0.526	0.138	-3.812	0.0002	***
Year2015	-0.613	0.136	-4.507	0.0000	***
Year2016	-0.462	0.136	-3.395	0.0008	***
Year2017	-0.649	0.135	-4.805	0.0000	***

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
Year2018	-0.838	0.141	-5.941	0.0000	***
Year2019	-1.118	0.147	-7.586	0.0000	***
Year2020	-0.889	0.156	-5.686	0.0000	***
Year2021	-0.667	0.152	-4.401	0.0000	***
Year2022	-1.328	0.153	-8.660	0.0000	***
Year2023	-1.062	0.157	-6.783	0.0000	***

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.1091517)

Null deviance: 98.08 on 287 degrees of freedom

Residual deviance: 28.16 on 258 degrees of freedom

AIC: 209.7

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名		変数略記
年		Year
季節		Quarter
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(静岡県・稲取地区)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある静岡県稲取地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2000～2023年
標準化に使用した期間	2000～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS IIから取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、0m層水温、0m層流速
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	標準化CPUEは2009年頃まで横ばい傾向であったが、それ以降減少した。しかし、2018年以降は再び増加に転じ、2021年は解析期間の最大値と同水準と推定された。しかし、2022年以降は減少し、2023年は2013～2018年と同程度の水準となった。ノミナルCPUEの長期的なトレンドは標準化CPUEと類似した一方、2004～2005年および2018年以降は標準化CPUEのほうが高い値となった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。静岡県の稲取地区のデータを用いて推定を行った結果、黒潮や漁場内の流速の影響による CPUE の低下が補正され、モデル診断結果も概ね良好であったことから、このモデルから得られた年トレンドを、キンメダイ太平洋系群の VPA のチューニング指数の 1 つとして利用することとなった。

今年度も昨年度に引き続き、最新年のデータを追加した上で静岡県稲取地区の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある静岡県の稲取地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2000～2023 年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM（log-normal GLM）である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に

影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁（流軸から 13 海里）の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した (Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141)。稲取地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 139 度における黒潮北縁緯度 (Lat_139) を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差（すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141) を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日：2024 年 4 月 4 日) における深度帯別 (0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層) の水温 (Temperature)、流向 (Direction)、流速 (Speed) の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、稲取地区では図 1 の 8 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。一方、8 番のグリッドでは水深が浅いことから、水温、流向、流速は 0 m 層、100 m 層、200 m 層、底層の再解析値のみを用いた。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後 8 方位のカテゴリカル変数 (Direcfct) に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係プロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと (図 2)、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果 (Year)、季節効果 (Quarter: 12 ヶ月を 1~3 月、4~6 月、7~9 月、10~12 月に 4 等分) については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \log(\text{CPUE}) \sim & \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{200} + \text{Temperature}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Speed}_0 + \text{Speed}_{100} + \text{Speed}_{200} + \text{Speed}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Direcfct}_0 + \text{Direcfct}_{100} + \text{Direcfct}_{200} + \text{Direcfct}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Lat}_{139} + \\ & \text{Lat138}_{139} + \text{Lat139}_{140} + \text{Lat140}_{141} \end{aligned}$$

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準（AIC）によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル（例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの）は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された（表 1）。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Temperature}_0 + \text{Speed}_0$$

稲取地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 10 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小 AIC+2 の範囲の他のモデルをみると、多くのモデルで共通して 0 m 流速、0 m 水温、東経 139~140 度における黒潮北縁の緯度差が含まれており、黒潮の影響や漁場内の流れに関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数への CPUE の応答（図 4）からも、漁場内の流速および水温による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった（図 5）。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった（図 6）。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は 2000 年以降、2009 年頃まで増減を繰り返しながらも横ばい傾向であったが、その後減少した。しかし、2018 年以降は再び増加に転じ、2021 年は解析期間の最大値である 2005 年と同水準と推定された。2022 年以降は減少に転じ、2023 年は 2013~2018 年と同程度の水準と推定された。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と類似した一方、2004~2005 年および 2018 年以降は標準化 CPUE のほうが高い値となった。それ以外はノミナル CPUE のほうが高い年が多く、特に 2000 年、2001 年、2009 年、2014~2016 年はノミナル CPUE の値が標準化 CPUE よりも顕著に大きかった。

3.2 昨年度結果との比較

昨年度と同様、東経 139~140 度における黒潮北縁の緯度差と季節効果がベストモデルに含まれた。一方、昨年度ベストモデルに含まれなかった 0 m 水温が今年度は含まれたが、昨年度含まれた 200 m 流速が今年度は含まれていなかった。しかし、いずれの年度でも最小 AIC+2 の多くのモデルに 0 m 水温と 200 m 流向が含まれており、ベストモデルに基づく標準化 CPUE の年トレンドの変化も小さいことから、1 年分データが追加されたことによるモデル推定結果の大きな変化はなかったと判断できる。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の

漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf

- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和3（2021）年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和3年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもの
のうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向				黒潮北縁緯度			経度間の黒潮北縁の緯度差			流速				水温				季節	年	df	logLik	AIC	delta
	0	100	200	底	東経139度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	底	0	100	200	底								
3.94			+				0.04												+	+	38	-9.0	93.9	0.0
3.92			+																+	+	37	-10.2	94.3	0.4
3.69			+				0.05												+	+	37	-10.4	94.7	0.8
3.95			+				-0.02	0.04											+	+	39	-8.6	95.3	1.4
3.66			+																+	+	36	-11.7	95.4	1.5
3.93			+				-0.03												+	+	38	-9.7	95.5	1.5
4.67			+		-0.02		0.06												+	+	39	-8.8	95.6	1.6
3.92							0.04												+	+	31	-16.8	95.6	1.7
3.90																			+	+	30	-17.9	95.8	1.9
3.94			+				0.04	0											+	+	39	-9.0	95.9	2.0

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2000	1.16	1.04	0.82	1.30	0.11
2001	1.25	1.10	0.97	1.26	0.07
2002	1.00	0.94	0.79	1.12	0.09
2003	1.19	1.18	1.08	1.28	0.04
2004	1.07	1.29	1.08	1.55	0.09
2005	1.34	1.35	1.22	1.50	0.05
2006	1.20	1.04	0.93	1.17	0.06
2007	1.05	1.04	0.93	1.16	0.05
2008	1.24	1.23	1.10	1.36	0.05
2009	1.42	1.22	1.05	1.38	0.07
2010	1.05	1.04	0.90	1.19	0.07
2011	0.95	0.93	0.83	1.05	0.06
2012	1.06	1.03	0.90	1.18	0.07
2013	0.76	0.70	0.58	0.81	0.08
2014	0.90	0.78	0.62	0.93	0.10
2015	0.83	0.76	0.65	0.87	0.07
2016	0.86	0.76	0.66	0.88	0.08
2017	0.75	0.71	0.61	0.81	0.07
2018	0.64	0.72	0.62	0.84	0.08
2019	0.74	0.93	0.74	1.18	0.12
2020	0.94	1.13	0.89	1.37	0.11
2021	1.07	1.30	1.09	1.52	0.09
2022	0.87	1.01	0.89	1.15	0.07
2023	0.64	0.76	0.61	0.92	0.11

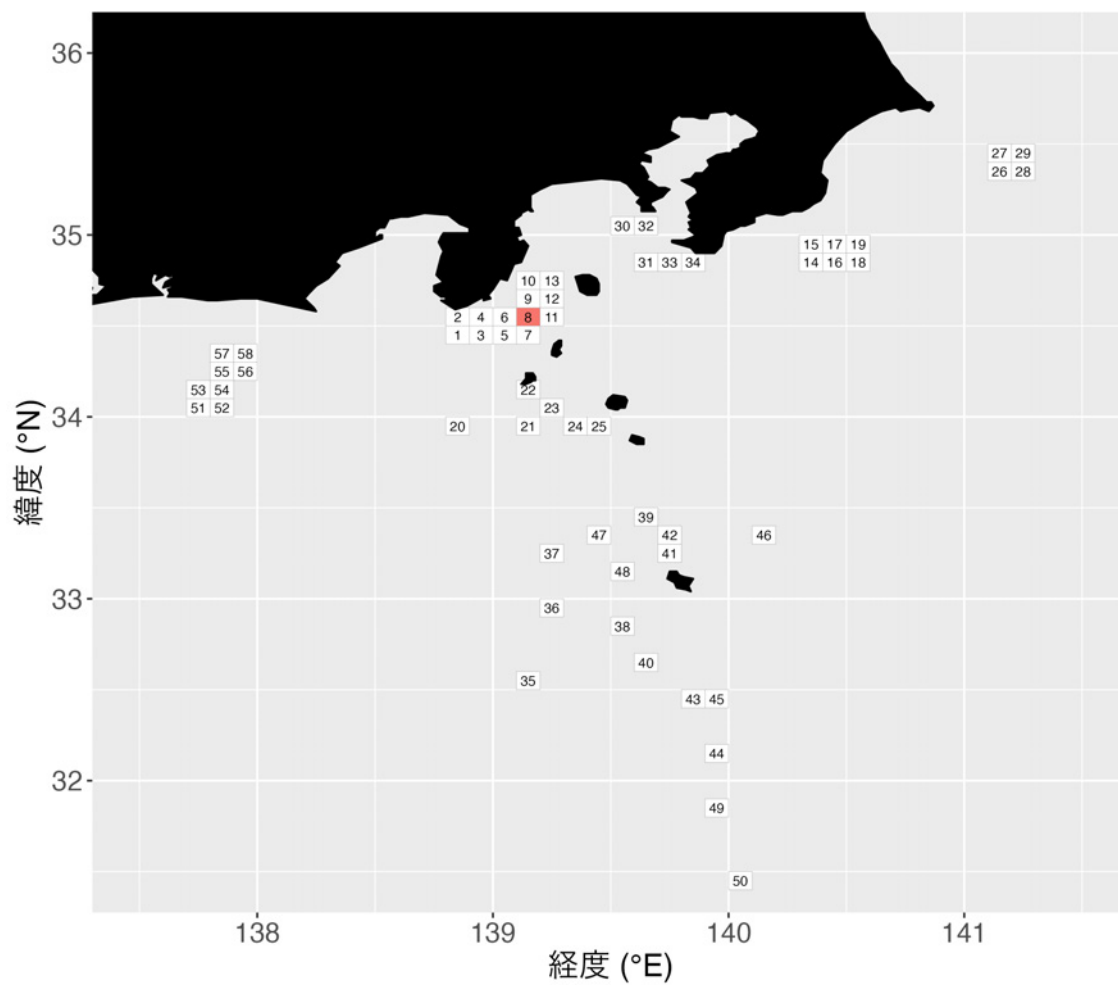


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。稲取地区は8番のグリッドを使用。

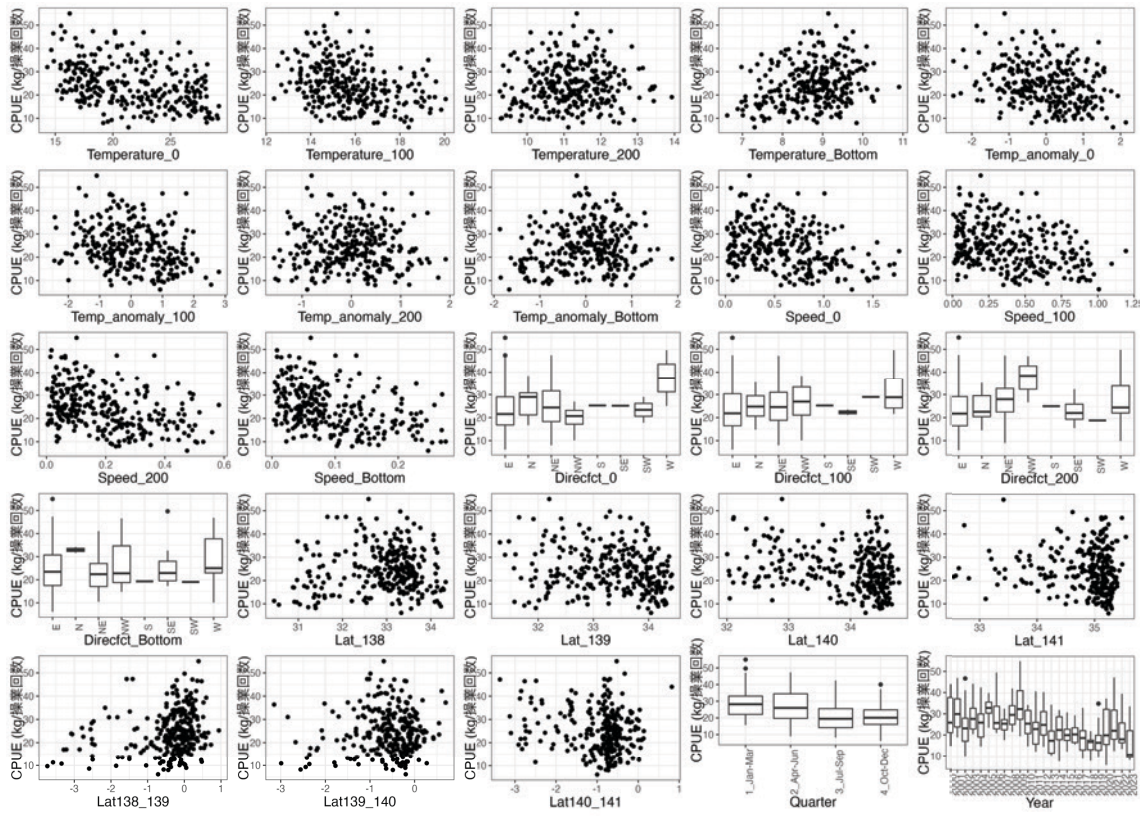


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

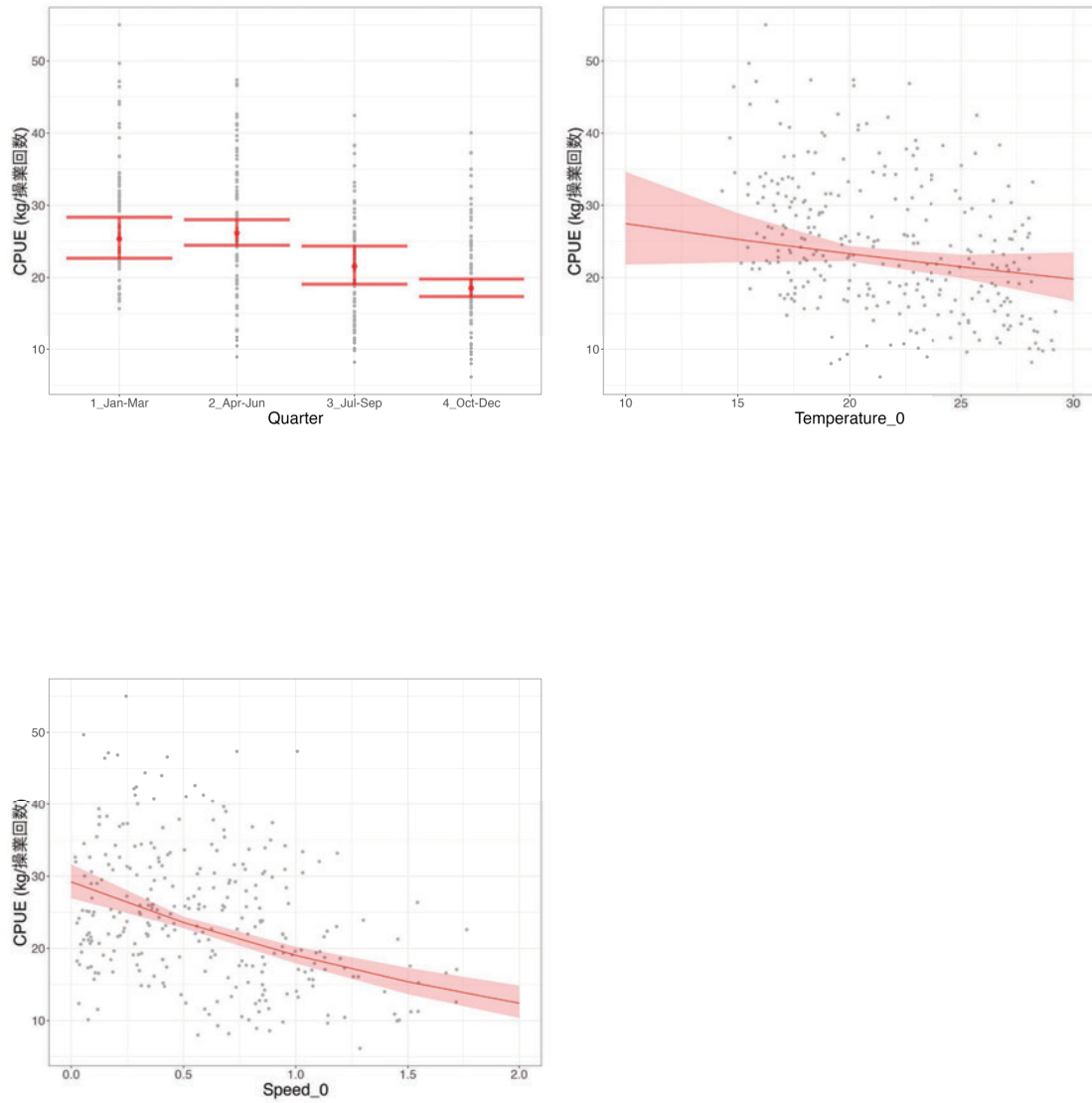


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

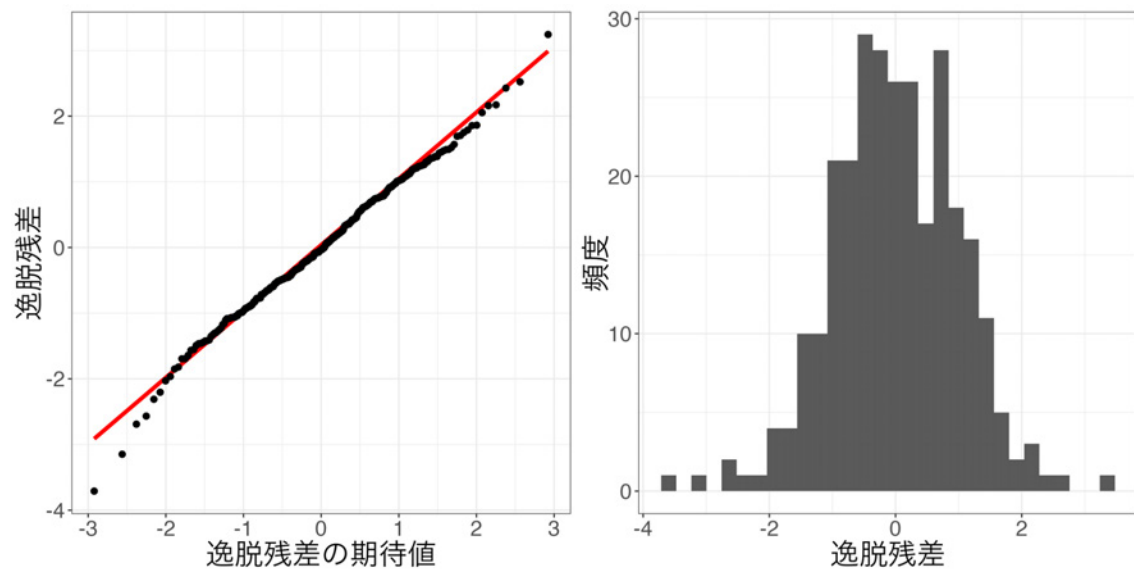


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

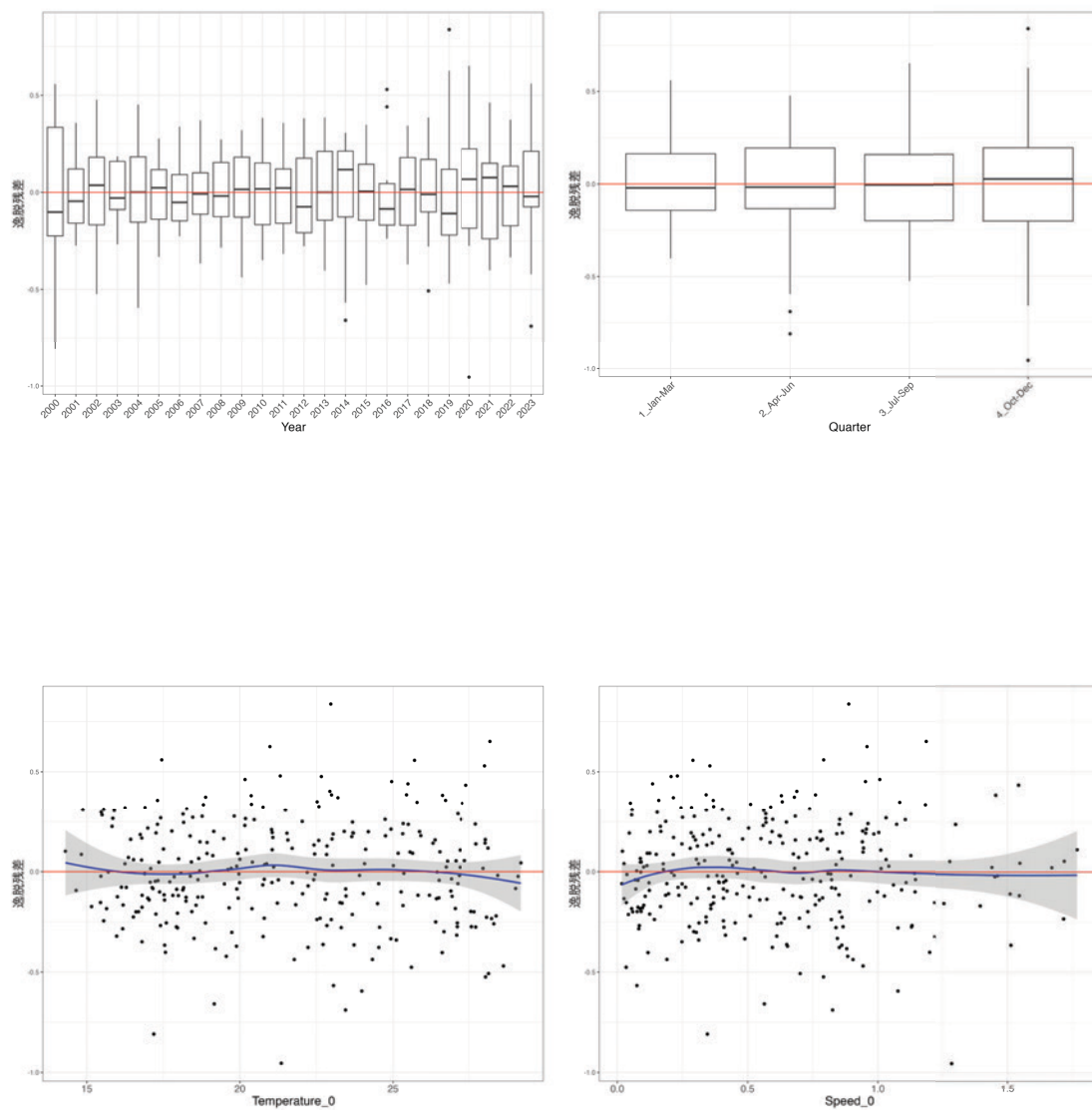


図6. ベストモデルの層別逸脱残差 Temperature_0、Speed_0に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その95%信頼区間を示す。

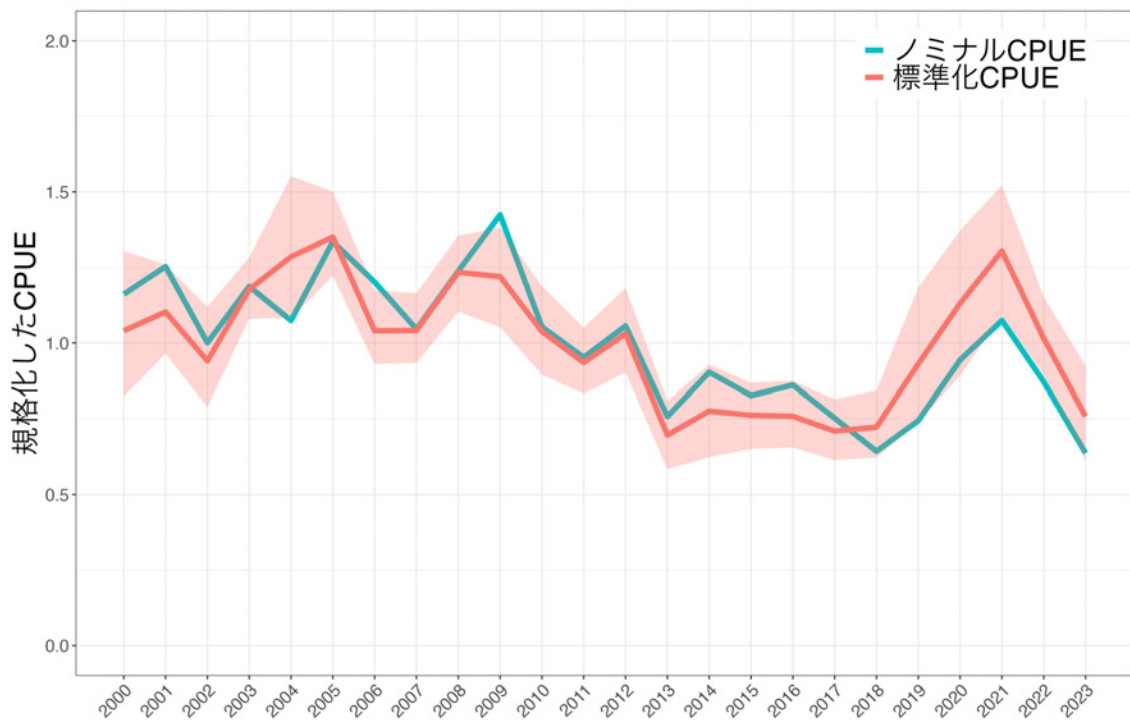


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Quarter + Speed_0 + Temperature_0 + Year + 1, family = gaussian,
data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	3.901	0.183	21.307	0.0000	***
Quarter2_Apr-Jun	0.032	0.057	0.560	0.5757	
Quarter3_Jul-Sep	-0.162	0.110	-1.479	0.1403	
Quarter4_Oct-Dec	-0.313	0.069	-4.506	0.0000	***
Speed_0	-0.428	0.064	-6.733	0.0000	***
Temperature_0	-0.016	0.010	-1.636	0.1030	
Year2001	0.058	0.111	0.524	0.6007	
Year2002	-0.101	0.112	-0.902	0.3676	
Year2003	0.124	0.111	1.111	0.2674	
Year2004	0.211	0.117	1.806	0.0721	.
Year2005	0.261	0.111	2.345	0.0198	*
Year2006	-0.000	0.111	-0.002	0.9987	
Year2007	0.001	0.111	0.008	0.9938	
Year2008	0.171	0.111	1.535	0.1261	
Year2009	0.159	0.111	1.430	0.1541	
Year2010	-0.002	0.111	-0.020	0.9841	
Year2011	-0.107	0.112	-0.957	0.3395	
Year2012	-0.009	0.111	-0.082	0.9348	
Year2013	-0.401	0.111	-3.610	0.0004	***
Year2014	-0.293	0.111	-2.643	0.0087	**
Year2015	-0.311	0.111	-2.806	0.0054	**
Year2016	-0.316	0.111	-2.840	0.0049	**
Year2017	-0.382	0.111	-3.435	0.0007	***
Year2018	-0.364	0.114	-3.183	0.0016	**

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
Year2019	-0.111	0.120	-0.925	0.3560	
Year2020	0.084	0.120	0.696	0.4870	
Year2021	0.226	0.120	1.884	0.0608	.
Year2022	-0.025	0.116	-0.212	0.8320	
Year2023	-0.316	0.120	-2.633	0.0090	**

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.07371695)

Null deviance: 46.08 on 287 degrees of freedom

Residual deviance: 19.09 on 259 degrees of freedom

AIC: 95.78

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名		変数略記
年		Year
季節		Quarter
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(静岡県・御前崎地区)

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある静岡県御前崎地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1日1隻あたり漁獲量(kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2002～2023年
標準化に使用した期間	2002～2023年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0にて、stats-ver. 4.4.0(GLM計算)、MuMIn-ver. 1.47.5(モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3(Excelファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0(モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1(作図)、gridExtra-ver. 2.3(作図)、lubridate-ver. 1.9.3(時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2(説明変数に対するlsmean計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布:対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC総当たり法ののち、最小AIC+2の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS IIから取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、200m層水温、地先における黒潮北縁の緯度(東経138度)、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経138度-139度)
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を1,000回繰り返した。
標準化の結果	標準化CPUEは2017年まで横ばいで推移したが、2018年以降、年による小さな増減を伴いつつも急激な増加が続いている。2023年は前年より増加し、解析期間中で最も高い値となっている。標準化CPUEとノミナルCPUEの傾向に大きな違いはみられなかったが、2002～2004年、2006年、2010～2012年、2014年、2019年は標準化CPUEのほうが高く、それ以外の年の多くはノミナルCPUEのほうが高かった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に排除していないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。その結果、一都三県の 7 地区のうち、6 地区における標準化 CPUE は、環境要因の影響がより考慮されたと判断されたこと、モデル診断結果も良好であったことから、VPA のチューニング指数として導入するに至った（八丈島地区は引き続き標準化 CPUE を検討中）。令和 5 年度には、本系群の資源評価で今後検討すべき課題の 1 つとして整理されている「CPUE 標準化未実施の海域への拡大」に対応するため、新たに静岡県の御前崎地区におけるデータを用いた標準化 CPUE を検討した（亘ほか 2024）。その結果、黒潮や水温の影響による CPUE の変化が補正され、モデル診断結果も概ね良好であったことから、このモデルから得られた年トレンドを、キンメダイ太平洋系群の VPA のチューニング指数の 1 つとして利用することとなった。

今年度は、昨年度使用したデータセットに最新年のデータを追加し、静岡県御前崎地区の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある静岡県の御前崎地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準

化の期間は、2002～2023年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM (log-normal GLM) である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁 (流軸から 13 海里) の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した (Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141)。御前崎地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 138 度における黒潮北縁緯度 (Lat_138) を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差 (すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141) を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II (Kuroda et al., 2017, データアクセス日: 2024 年 4 月 4 日) における深度帯別 (0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層) の水温 (Temperature)、流向 (Direction)、流速 (Speed) の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、御前崎地区では図 1 の 51～54 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数 (Direcfct) に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係プロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと (図 2)、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果 (Year)、季節効果 (Quarter: 12 ヶ月を 1～3 月、4～6 月、7～9 月、10～12 月に 4 等分) については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} +$$

Temperature_0 + Temperature_100 + Temperature_200 + Temperature_400 + Temperature_Bottom
 +
 Speed_0 + Speed_100 + Speed_200 + Speed_400 + Speed_Bottom +
 Direcft_0 + Direcft_100 + Direcft_200 + Direcft_400 + Direcft_Bottom +
 Lat_138 +
 Lat138_139 + Lat139_140 + Lat140_141

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準（AIC）によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル（例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの）は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータにより、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された（表 1）。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Temperature}_{200} + \text{Lat}_{138} + \text{Lat}_{138_139}$$

御前崎地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 26 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小 AIC+2 の範囲の他のモデルをみると、ベストモデルの説明変数の他に、多くのモデルで東経 139 度以東における黒潮入込の指標や流速も含まれており、黒潮の影響や漁場内の流れ、水温に関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数への CPUE の応答（図 4）からも、黒潮位置や入込の強弱、水温による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった（図 5）。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった（図 6）。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は 2017 年まで横ばいで推移したが、2018 年以降、年による小さな増減を伴いつつも急激な増加を続けている。2023 年は前年から増加し、解析期間中で最も高い値となっている。標準化 CPUE とノミナル CPUE の傾向に大きな違いはみられなかったが、2002～2004 年、2006 年、2010～2012 年、2014 年、2019 年は標準化 CPUE のほうが高く、それ以外の年の多くはノミナル CPUE のほうが高かった。

3.2 昨年度結果との比較

今年度のベストモデルで選択された説明変数は、昨年度のものと同様であり、ベストモデルから得られた標準化 CPUE とのトレンドに昨年度との大きな違いはなかった。

引用文献

Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.

- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf
- 亘 真吾・竹茂愛吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・半沢祐大 (2024) 令和 5 (2023) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2024-AC037, 令和 5 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 69pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2024/03/details_2023_37.pdf
- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和 3 (2021) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和 3 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもの
のうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向					黒潮北緯緯度				経度間の黒潮北緯の緯度差				流速					水温					季節	年	df	logLik	AIC	delta		
	0	100	200	400	底	東経138度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	400	底	0	100	200	400	底	0	100	200	400							底	
12.16						-0.25	0.25	0.10	0.08																		+	28	-75.0	206.1	0.0
8.91						-0.16	0.17																				+	26	-77.0	206.1	0.0
8.28						-0.14	0.16										-0.31										+	27	-76.3	206.6	0.5
10.07						-0.19	0.19	0.05																			+	27	-76.3	206.6	0.6
8.21						-0.14	0.16										-0.25										+	27	-76.3	206.7	0.6
8.26						-0.14	0.15										-0.39								0.15		+	27	-76.4	206.8	0.7
11.47						-0.23	0.24	0.09	0.07								-0.28										+	29	-74.4	206.9	0.8
11.42						-0.23	0.24	0.10	0.07								-0.23										+	29	-74.5	206.9	0.8
9.09						-0.16	0.16																		0.12		+	26	-77.5	207.0	0.9
8.58						-0.15	0.16										-0.39										+	27	-76.5	207.0	0.9
8.22						-0.14	0.15										-0.31										+	27	-76.5	207.0	1.0
9.43						-0.17	0.18	0.05									-0.31										+	28	-75.6	207.2	1.1
9.37						-0.17	0.18	0.05									-0.25										+	28	-75.6	207.2	1.1
11.76						-0.24	0.24	0.10	0.07										-0.34								+	29	-74.6	207.2	1.2
8.65						-0.15	0.15												-0.48								+	27	-76.7	207.4	1.3
11.68						-0.24	0.25	0.10	0.08																		+	29	-74.7	207.4	1.4
8.44						-0.15	0.16										-0.13										+	27	-76.7	207.4	1.4
9.41						-0.17	0.18		0.03																		+	27	-76.7	207.5	1.4
9.74						-0.18	0.18	0.06											-0.40								+	28	-75.8	207.5	1.4
8.37						-0.14	0.15										-0.19										+	27	-76.9	207.7	1.6
12.05						-0.24	0.23	0.08	0.08																		+	28	-75.9	207.7	1.6
9.60						-0.18	0.19	0.06																			+	28	-75.9	207.8	1.8
12.20						-0.25	0.25	0.10	0.08										0.19								+	29	-75.0	208.0	1.9
11.09						-0.22	0.22	0.08	0.07								-0.35										+	29	-75.0	208.0	1.9
8.92						-0.16	0.17												0.10								+	27	-77.0	208.1	2.0
9.13						-0.16	0.17	0.04									-0.38										+	28	-76.0	208.1	2.0

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2002	0.72	0.87	0.75	1.00	0.08
2003	0.75	0.87	0.71	1.04	0.10
2004	0.72	0.83	0.69	0.99	0.09
2005	1.19	0.98	0.74	1.42	0.17
2006	0.80	0.89	0.71	1.20	0.14
2007	0.79	0.73	0.60	0.90	0.10
2008	0.62	0.62	0.52	0.74	0.09
2009	0.62	0.62	0.50	0.74	0.10
2010	0.64	0.73	0.58	0.90	0.12
2011	0.69	0.79	0.66	0.94	0.09
2012	0.86	0.92	0.76	1.08	0.09
2013	0.87	0.82	0.66	0.99	0.10
2014	1.05	1.14	0.97	1.33	0.08
2015	0.84	0.79	0.61	0.98	0.12
2016	0.90	0.88	0.74	1.04	0.09
2017	0.99	0.88	0.68	1.10	0.12
2018	1.12	1.02	0.78	1.29	0.13
2019	1.35	1.44	1.24	1.62	0.07
2020	1.46	1.41	1.22	1.63	0.08
2021	1.59	1.57	1.32	1.84	0.09
2022	1.70	1.53	1.17	1.96	0.13
2023	1.72	1.66	1.36	1.98	0.10

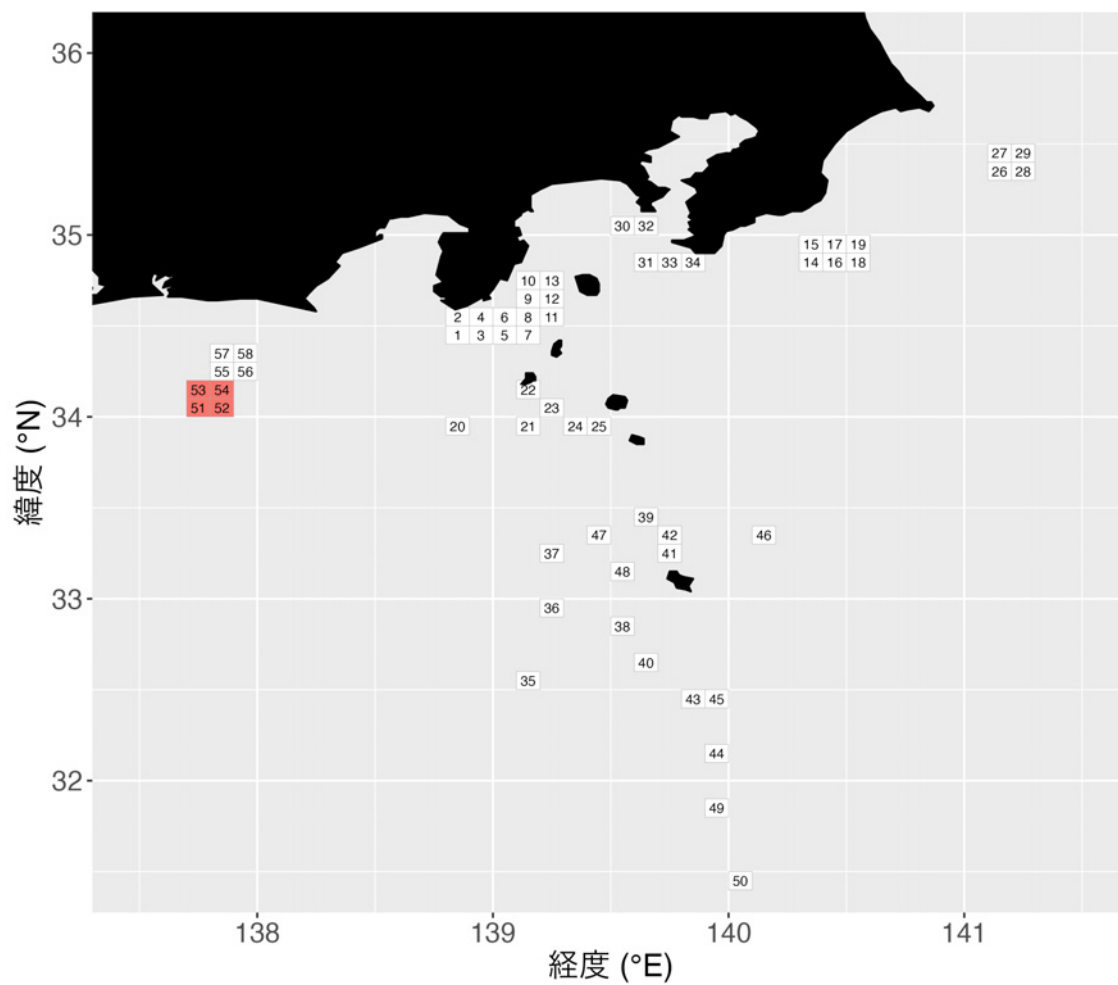


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。御前崎地区は51～54番のグリッドを使用。

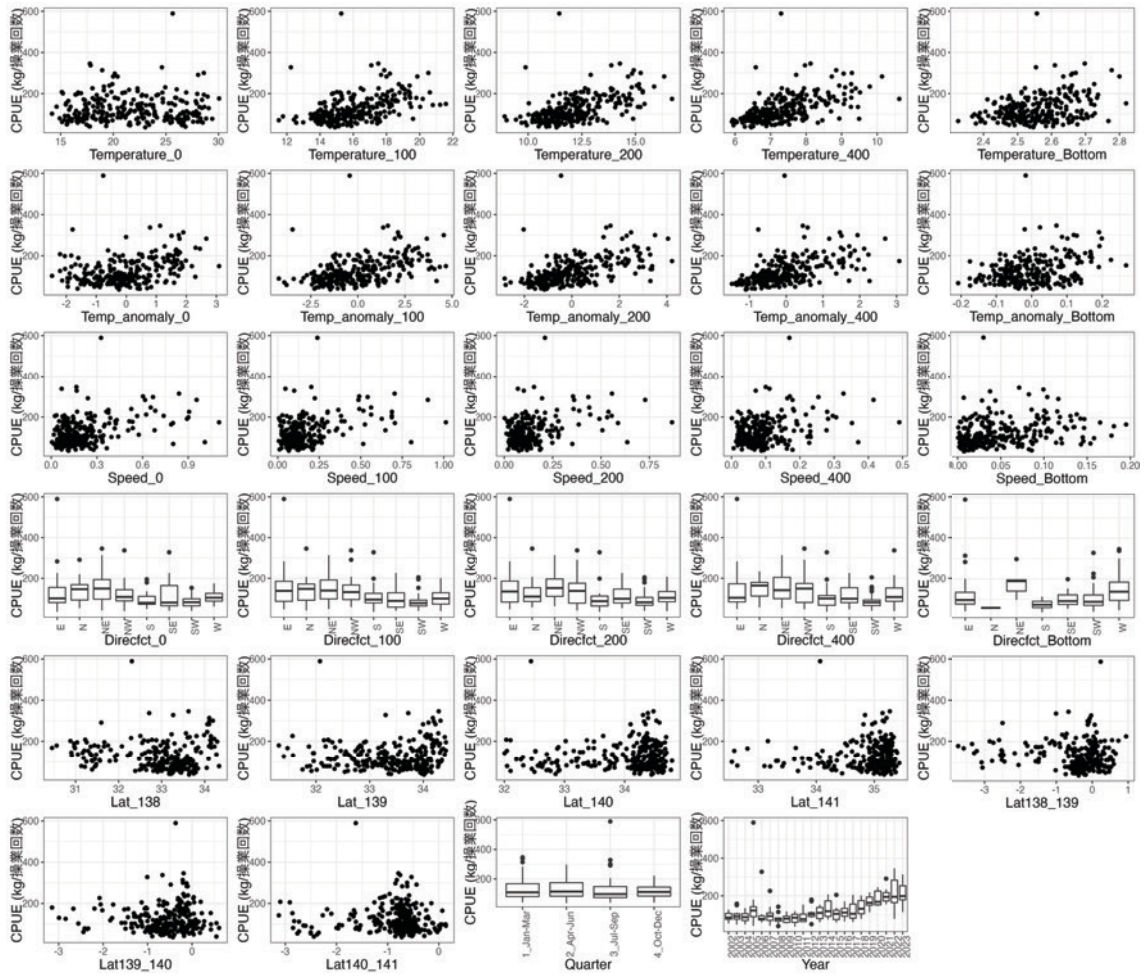


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

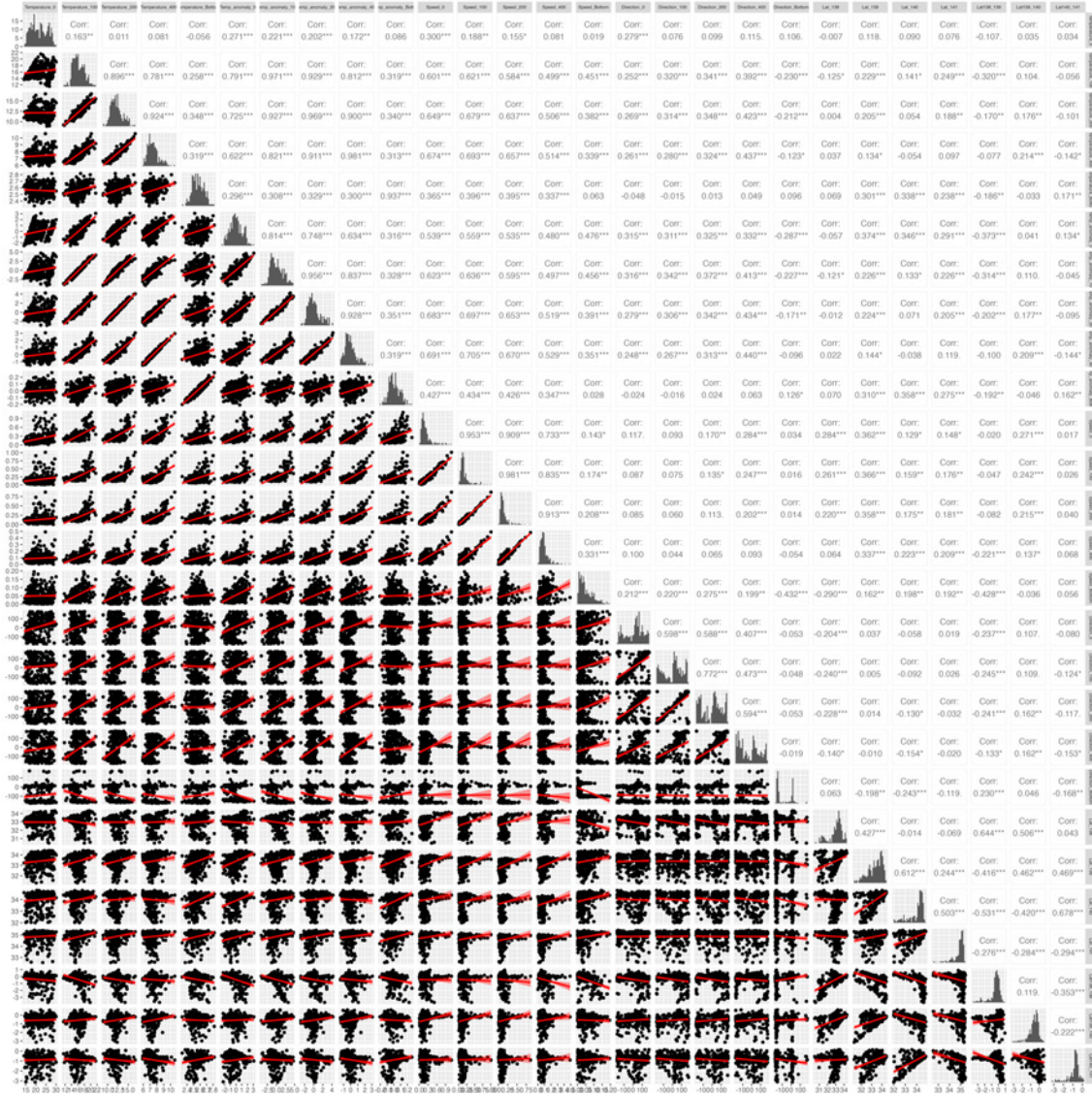


図 3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

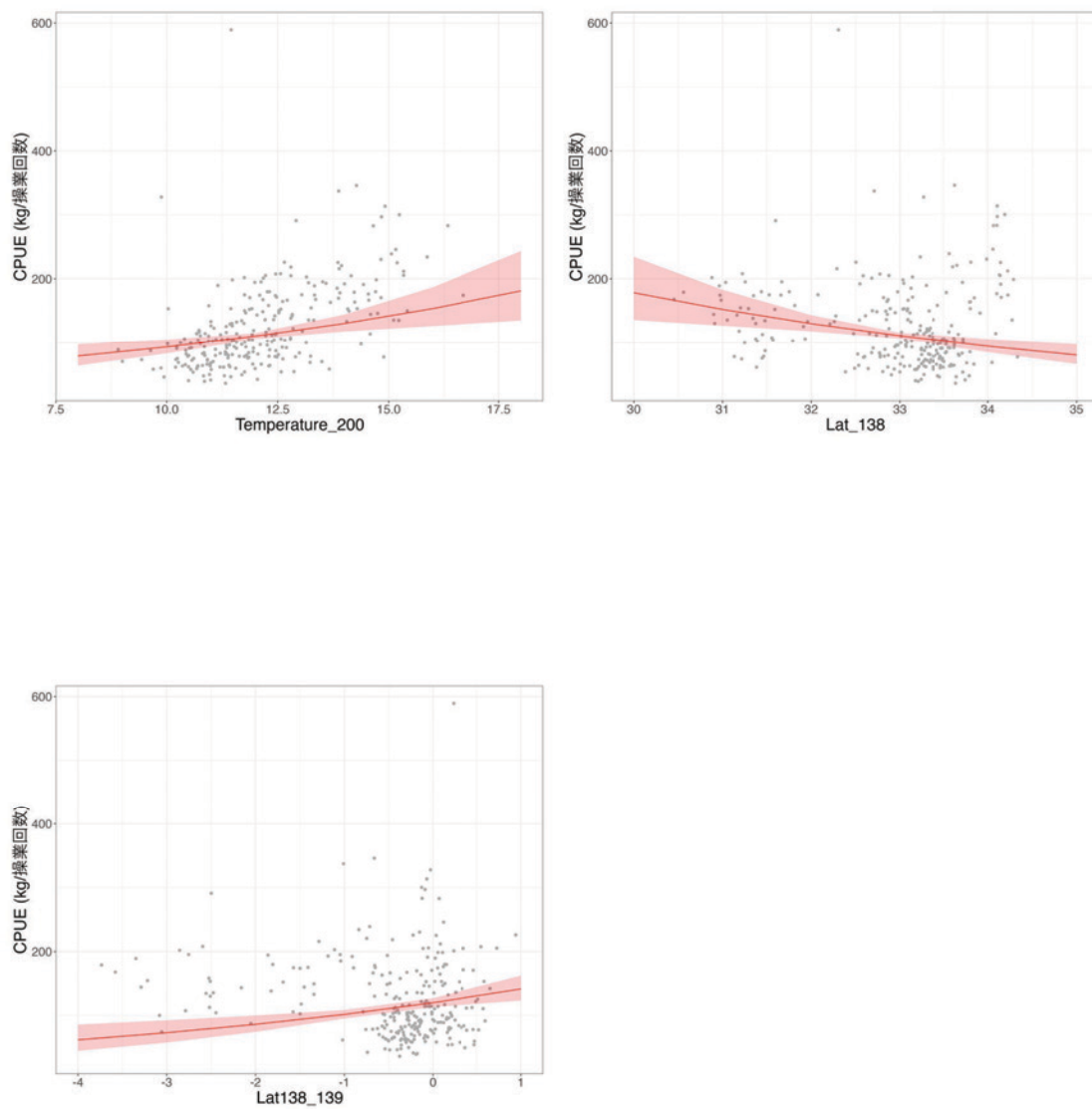


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

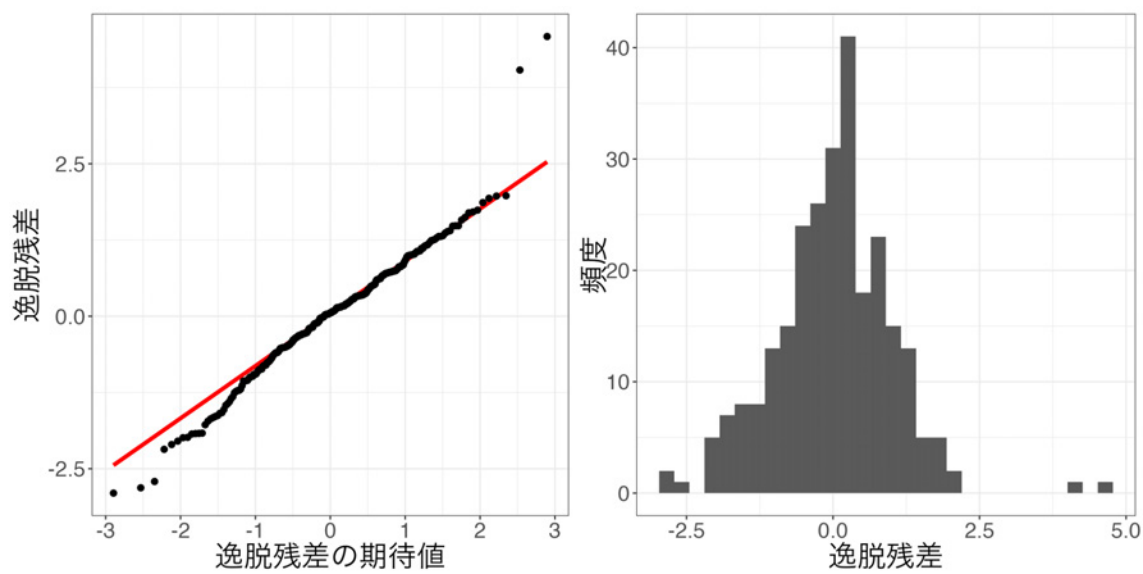


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

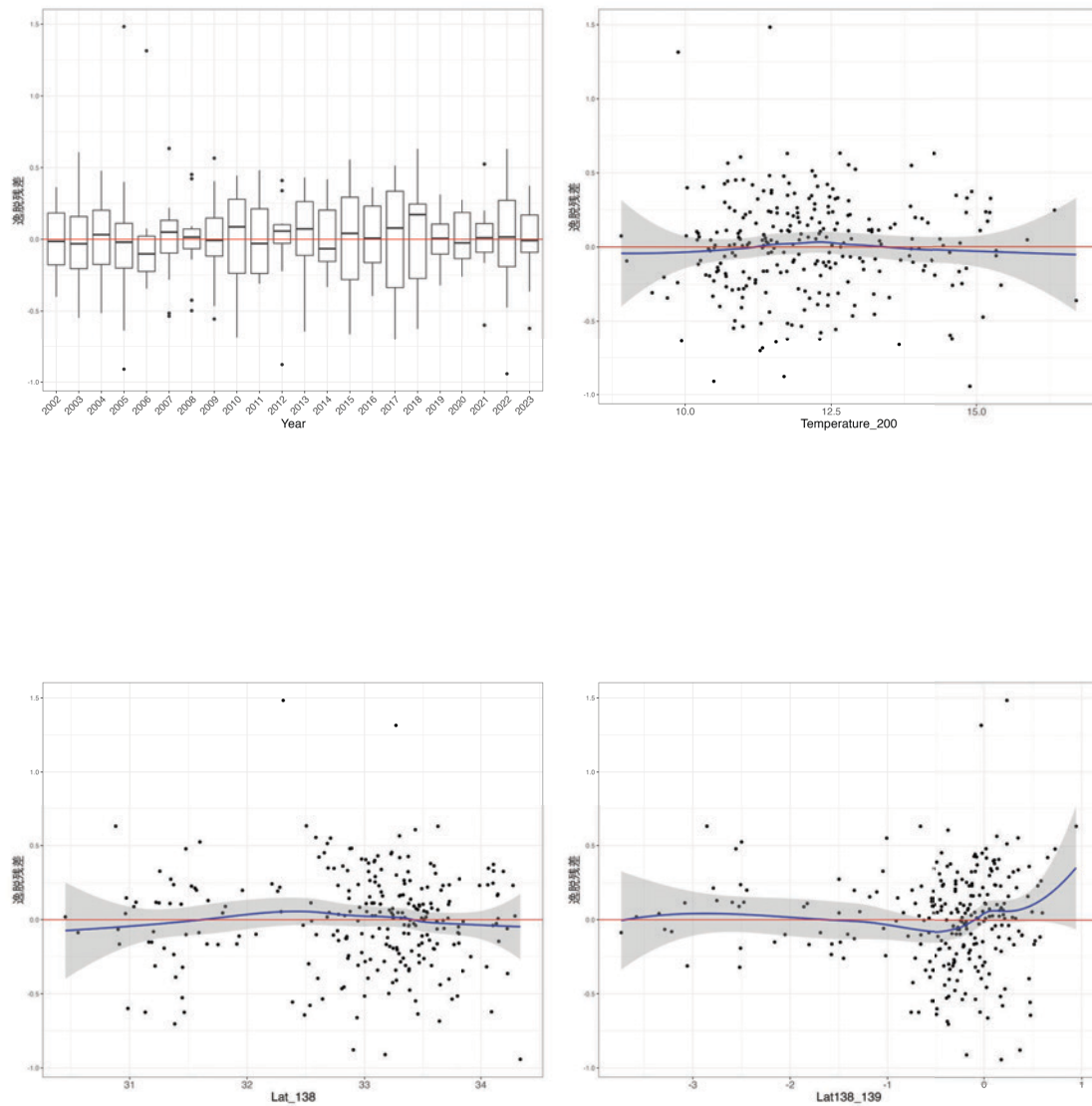


図 6. ベストモデルの層別逸脱残差 Temperature_200、Lat_138、Lat138_139 に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

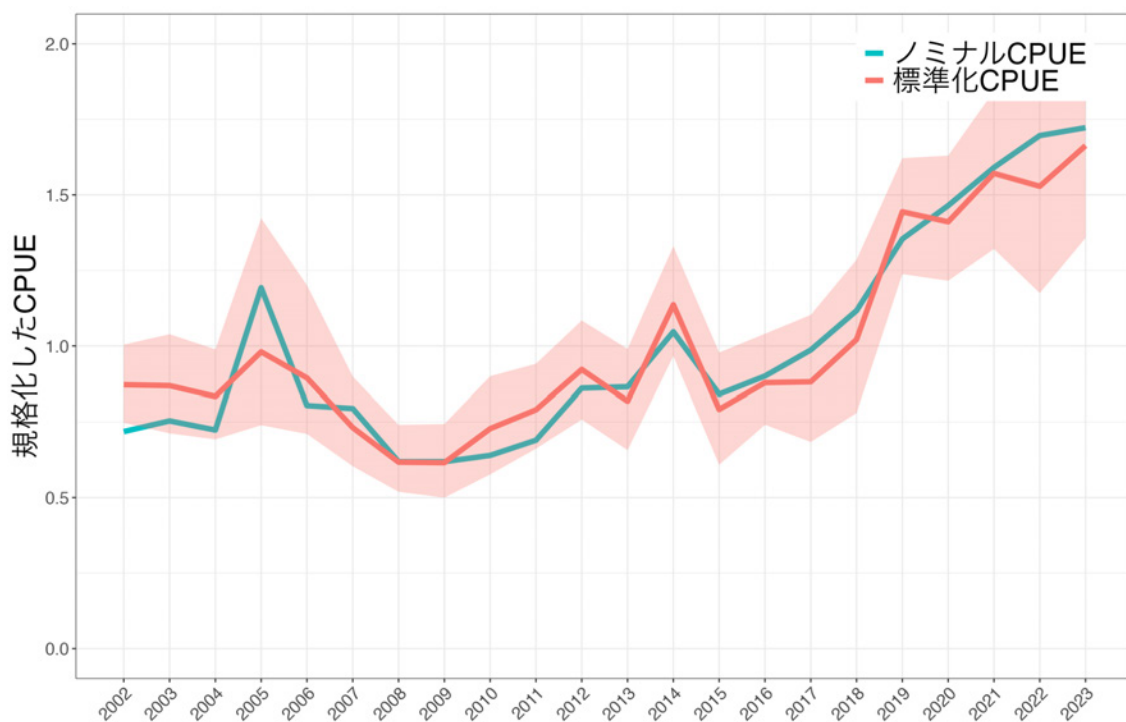


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Lat_138 + Lat138_139 + Temperature_200 + Year + 1, family = gaussian, data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	8.915	1.636	5.448	0.0000	***
Lat_138	-0.159	0.047	-3.409	0.0008	***
Lat138_139	0.165	0.046	3.588	0.0004	***
Temperature_200	0.083	0.025	3.270	0.0012	**
Year2003	-0.003	0.139	-0.025	0.9804	
Year2004	-0.045	0.144	-0.310	0.7565	
Year2005	0.117	0.148	0.791	0.4298	
Year2006	0.025	0.143	0.178	0.8591	
Year2007	-0.176	0.145	-1.212	0.2268	
Year2008	-0.345	0.144	-2.394	0.0174	*
Year2009	-0.348	0.146	-2.380	0.0181	*
Year2010	-0.181	0.140	-1.292	0.1978	
Year2011	-0.099	0.140	-0.704	0.4819	
Year2012	0.056	0.141	0.400	0.6898	
Year2013	-0.063	0.146	-0.435	0.6642	
Year2014	0.265	0.142	1.868	0.0630	.
Year2015	-0.097	0.146	-0.664	0.5072	
Year2016	0.008	0.145	0.054	0.9570	
Year2017	0.011	0.151	0.072	0.9426	
Year2018	0.158	0.162	0.976	0.3301	
Year2019	0.504	0.158	3.199	0.0016	**
Year2020	0.481	0.160	3.010	0.0029	**
Year2021	0.589	0.159	3.702	0.0003	***
Year2022	0.561	0.163	3.433	0.0007	***

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
Year2023	0.646	0.165	3.917	0.0001	***

*Signif. codes: 0 <= '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05*

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.115932)

Null deviance: 59.39 on 263 degrees of freedom

Residual deviance: 27.71 on 239 degrees of freedom

AIC: 206.08

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名		変数略記
年		Year
季節		Quarter
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcft_0
	100 m	Direcft_100
	200 m	Direcft_200
	400 m	Direcft_400
	底層	Direcft_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141